



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**EVALUACIÓN COMPUTACIONAL Y EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE
ÓRTESIS NEUROMUSCULARES IMPRESAS EN 3D: UNA REVISIÓN DE LA LITERATURA**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO:

INGENIERO EN BIOMÉDICA

PRESENTADO POR:

22011142 LIZZIE DAYANIRA MURILLO ROMERO

ASESOR: KARLA REYES

CAMPUS: SAN PEDRO SULA

ABRIL, 2024

DEDICATORIA

Dedico esta tesis primeramente a Dios, quien me dio las fuerzas para poder culminarla de la mejor manera. Igualmente, a mis padres Geraldo Murillo y Lizeth Romero quienes a lo largo de mis 21 años me han brindado su apoyo y amor incondicional junto a todo lo necesario para poder ser la persona que soy hoy en día, cada sacrificio que han hecho ha dado frutos ya que han permitido que este a un paso de culminar mi carrera profesional. Me han enseñado que no hay límite para lograr lo que sea que me proponga, siempre poniendo a Dios en mi camino y teniendo fe, haciendo caso omiso a malos comentarios.

-Lizzie Dayanira Murillo Romero

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por permitirme llegar a este momento importante de mi carrera profesional, por no dejarme de la mano, ayudándome a dar todo de mi en todo momento, aun en los momentos difíciles, así como la oportunidad de ser estudiante de una importante institución, la cual me ayuda a dar mi máximo potencial. Agradezco a todos los docentes que pudieron enseñarme a lo largo de mi carrera profesional, por sus lecciones académicas y consejos de vida, que me han sido útil para culminar mi tesis, asimismo me serán útiles en mi vida profesional. A Emilia Antúnez, Katty Sánchez, Emely Romero y Jose Martínez, quienes fueron por su compañía a lo largo de mi carrera universitaria, los cuales me apoyaron y ayudaron a disfrutar esta etapa, con risas, consejos y desvelos y momentos inolvidables que guardaré siempre, también a mis amigos de carrera, quienes hicieron que no desistiera a pesar de las dificultades presentadas, por los mutuos apoyos y consejos, y los que hicieron que disfrutaré aún más mi carrera. A mis abuelas y mis hermanos, por siempre apoyarme, nunca juzgarme y motivarme a dar lo mejor de mí. Por último, a mis mascotas, Keisha y Jager, por darme alegría y sacarme una sonrisa cuando más lo necesitaba.

-Lizzie Dayanira Murillo Romero

EPÍGRAFE

La creatividad, imaginación e intuición más que la base del medio juego, son indispensables, así como el carácter firme; el triunfo llega solamente con la lucha.

-Gari Kaspárov.

RESUMEN EJECUTIVO

Una órtesis es un aparato externo que se utiliza para apoyar y ayudar a partes específicas del cuerpo que requieren de ayuda complementaria. Este estudio se centró en órtesis neuromusculares los cuales son dispositivos aplicados al cuerpo con el fin de cambiar las conductas funcionales y estructurales del sistema neuromusculoesquelético. El objetivo principal fue realizar una revisión exhaustiva de la literatura de las propiedades mecánicas de las órtesis neuromusculares impresas en 3D, utilizando las metodologías experimentales y computacionales. Se seleccionaron 14 artículos, los cuales describen los métodos y materiales utilizados para la fabricación de dichos aparatos, se realizó la búsqueda en IEEE Xplore y PubMed, considerando solamente los publicados en 2014-2024. Teniendo una integración de enfoques, tanto cuantitativo como cualitativo. Según resultados, el 43% de los artículos eran de ortesis muñeca-mano, el 36% de ortesis de columna vertebral y el 21% de ortesis tobillo-pie. Como resultado se describe brevemente cada artículo como también gráficos de los aspectos clave a considerar en los mismos, como ser el material de impresión, método de impresión, diseño geométrico, si se utilizó la evaluación computacional osea FEA o softwares y validación de la eficiencia de las órtesis. En la discusión se describe brevemente los posibles pros y contras de los aspectos considerados para la revisión de los artículos, el FEA e impacto biomecánico no son para todos los artículos, solamente donde destaca su mención. Se concluyó definiendo los aspectos que destacaron más según su usabilidad en los artículos.

ABSTRACT

An orthosis is an external device that is used to support and assist specific parts of the body that require additional help. This study focused on neuromuscular orthoses which are devices applied to the body in order to change the functional and structural behaviors of the neuromusculoskeletal system. The main objective was to carry out a comprehensive literature review of the mechanical properties of 3D printed neuromuscular orthoses, using experimental and computational methodologies. 14 articles were selected, which describe the methods and materials used for the manufacture of said devices, the search was carried out in IEEE Xplore and PubMed, considering only those published in 2014-2024. Having an integration of approaches, both quantitative and qualitative. According to the results, 43% of the articles were wrist-hand orthoses, 36% were spine orthoses, and 21% were ankle-foot orthoses. As a result, each article is briefly described as well as graphics of the key aspects to be considered in them, such as the printing material, printing method, geometric design, whether the computational evaluation of bone FEA or software was used and validation of the efficiency of the orthoses. The discussion briefly describes the possible pros and cons of the aspects considered for the review of the articles, the FEA and biomechanical impact are not for all articles, only where their mention stands out. It was concluded by defining the aspects that stood out the most according to their usability in the articles.

I. ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	Índice De Contenido.....	9
I.	Introducción	1
II.	Objetivos.....	3
	2.1 Objetivo General.....	3
	2.2 Objetivos Específicos.....	3
III.	Estado del Arte	4
	3.1 Antecedentes	4
	3.2 Problemática.....	17
	3.3 Imagen Integradora.....	19
	3.3 Tabla de Limitaciones	19
IV.	Metodología.....	22
	4.1 Enfoque	23
	4.2 Objeto de Investigación.....	23
	4.4 Materiales Y Métodos.....	24
V.	Resultados.....	25
	5.1 Who	26
	5.2 Órtesis de Columna Vertebral.....	30
	5.3 Afo.....	33
VI.	DISCUSIÓN.....	39
	6.1 Propiedades de los Materiales de Impresión 3D.....	39
	6.2 Consideraciones de los Métodos de Impresión 3D.....	42
	6.3 Softwares	42
	6.4 Análisis de Elementos Finitos (FEA)	43
	6.5 Diseño Geométrico	44
	6.6 Validación de la Eficiencia de las Órtesis.....	46
	6.7 Relación entre los Materiales de Impresión y las Propiedades Mecánicas	47
	6.8 Relación entre los Métodos de Impresión y la Eficiencia de la Órtesis.....	48

6.9 Relación entre los Softwares y el Diseño de las Órtesis	49
6.10 Limitaciones	49
VII. Conclusiones	51
VIII. Recomendaciones	54
IX. Referencias Bibliográficas.....	55
X. Anexos	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de impresión 3D.....	7
Figura 2. Órtesis de mano impresa en 3D para mejorar la función de la mano en pacientes con lesión en la médula espinal.....	11
Figura 3. Pasos clave para el modelado de la zapatilla.....	13
Figura 4. Esquema de trabajo propuesto.....	15
Figura 5. Órtesis de muñeca-mano impresas en 3D hechas de PLA y Pet-G.....	16
Figura 6. Proceso de selección de artículos de análisis profundo después de la búsqueda en la base de datos.....	25
Figura 7. Montaje de las probetas y muestras propuestas por (Popescu, Stochioiu, et al., 2023)..	27
Figura 8. Muestras impresas propuestas por (Łukaszewski et al., 2020). ..	28
Figura 9. Órtesis fabricadas verticalmente a partir de PLA propuestas por (Górski et al., 2020).....	29
Figura 10. Órtesis de columna vertebral propuestas por (Storm et al., 2022). ..	31
Figura 11. Escoliosis idiopática: corrección en el aparato ortopédico con TLSO fabricado con sistema ORTENR propuesto por (Raux et al., 2014).....	32
Figura 12. AFOs propuestas por (R. Xu et al., 2019).....	34
Figura 13. AFO generado después de escaneo, diseño y modificación propuesto por (Raj et al., 2022)..	35
Figura 14. Distribución de los materiales utilizados en los artículos.....	36
Figura 15. Distribución de los métodos de impresión utilizado en los artículos.....	37
Figura 16. Distribución de los softwares utilizados en los artículos.....	38
Figura 17. Distribución de porcentaje de los 5 artículos que consideran utilizar FEA.	39
Figura 18. Distribución de las propiedades mecánicas en los artículos en general.....	45
Figura 19. Histograma de la validación de la eficacia de las órtesis en los artículos.	46
Figura 20. Relación entre los materiales de impresión y las propiedades mecánicas.	47
Figura 21. Relación entre Métodos de impresión y la eficiencia de la órtesis.	48
Figura 22. Relación entre los softwares y el diseño de órtesis.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de limitaciones	19
---	----

LISTA DE SIGLAS

ABS	Acrilonitrilo Butadieno Estireno	MEX	Proceso de extrusión de materiales
AFO	Ankle-Foot Orthoses (Órtesis de tobillo-pie)	O&M	Orientación y Movilidad
CAD	Diseño Asistido por Computadora	PCL	Policaprolactona
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine	PE	Polietileno
EVA	Etileno Acetato de Vinilo	PET-G	Poli Tereftalato de Etilenglicol
FDM	Modelado por Deposición Fundida	PLA	Ácido Poli láctico
FEA	Finite Element Analysis (Análisis de elementos finitos)	PLA-C	Ácido-Poli láctico reforzado con Fibra de Carbono
FFF	Fabricación de Filamento Fundidos	PP	Polipropileno
FO	Foot Orthoses (Órtesis de pie)	RM	Resonancia Magnética
HIPS	Poliestireno de Alto Impacto	SLA	Estereolitografía
IE	IEEE Xplore	SLS	Sinterizado Selectivo por Láser
		TC	Tomografía Computarizada
		TPU	Poliuretano Termoplástico

WHO Wrist-Hand Orthoses (Órtesis de muñeca-mano)

I. INTRODUCCIÓN

Una órtesis es un aparato externo que se utiliza para apoyar y ayudar a partes específicas del cuerpo que requieren de ayuda complementaria, que, por diversas razones, tengan una lesión, malformación o patología que impida que el usuario realice sus actividades con normalidad (sinbarreras, 2021). Llegan a necesitar un proceso de rehabilitación, en este proceso, se proveen a la persona herramientas que le permitan afrontar estas limitaciones (Reyes Leiva et al., 2021). Son diseñados para brindar apoyo en casos de lesiones donde se requiere asistencia para moverse y estas no se lo permitan (Fisionline, 2021). La investigación se centrará en órtesis de miembros superiores, con el fin de modificar conductas funcionales y estructurales del sistema neuromusculoesquelético de áreas específicas (sinbarreras, 2021). La conjunción de tamaño reducido, capacidad de conducción trasera y salida de par posibilita que la órtesis brinde asistencia parcial sin obstaculizar el movimiento natural del usuario (Zhu et al., 2019). Generalmente, se fabrican mediante el proceso MEAM (Método de Evaluación y Análisis de Movimiento) (Popescu, Stochioiu, et al., 2023). Las órtesis impresas en 3D le ha enviado al usuario, una mayor comodidad, rápido y sin riesgos, con una mejor precisión en sus medidas, sin estar en contacto con el usuario, a través de escáneres 3D, reemplazando el método tradicional (Leite, 2020). Siendo una característica destacada en este ámbito, la habilidad para modular programáticamente la rigidez en tres dimensiones mediante la modificación de la geometría interna de los componentes impresos en 3D (Hudak et al., 2022). Además, cabe mencionar que no solo los factores del proceso pueden incidir en las propiedades mecánicas, sino también el tratamiento térmico posterior que se ejerza sobre ellas (Chalgham et al., 2021). Es notoria la cantidad de resultados eficientes que se ha tenido con las órtesis impresas en 3D, la capacidad de personalizar formas complejas, mejorar el efecto terapéutico y reducir costos de producción son algunas de las ventajas clave (Ronca et al., 2022). Entre una de las destacadas propiedades se considera el material de las órtesis, los investigadores han empleado diversas técnicas de prueba para poder analizarlas y escoger el que más le favorezca al paciente, pero la tarea de proporcionar recomendaciones clínicas específicas sobre la elección del material resulta desafiante (Kermen &

Mohammadi, 2021). Es adecuado utilizar modelos computacionales para validarlos mediante técnicas experimentales para imitar las condiciones reales, y al usar modelos de elementos finitos, representará mejor la aproximación óptima para prever las propiedades mecánicas de las órtesis (Ielapi, Forward, et al., 2019). Ha sido utilizado para abordar cuestiones como la remodelación ósea, diseño de implantes y las interacciones con la interfaz hueso-implante (Fu et al., 2018). Simulan y prevén el comportamiento de las órtesis, la simulación optimiza el proceso de fabricación al permitir ajustes en el diseño de las órtesis antes de su producción física, aumentando la eficiencia y reducción de tiempo y costos (Ielapi, Forward, et al., 2019). Al emplear simulaciones por computadora para elegir entre varios ángulos de una órtesis posibilitaría la elección de propiedades más apropiada (Gozar et al., 2018). Es esencial crear un modelo virtual que incluya una geometría esquelética compleja y propiedades mecánicas para obtener resultados precisos de FEA (X. Xu et al., 2021). Se han destacado varios estudios donde evidencian la efectividad los cuales demuestran que establecen un equilibrio biomecánico al aliviar el estrés y equilibrar la carga fisiológica (Gholampour et al., 2019). Una vez los resultados los resultados se obtuvieron, se completa lo que es la revisión exhaustiva de las propiedades mecánicas de las órtesis neuromusculares impresas en 3D, dando oportunidad de expresar posibles mejoras del proceso.

II. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar una revisión completo y profundo de la literatura de las propiedades mecánicas de las órtesis neuromusculares impresas en 3D con la finalidad de contribuir al avance y optimización de su fabricación y desempeño clínico, siendo una herramienta que agilice la búsqueda de aspectos clave no mencionados en los artículos, a través de evaluaciones computacionales y experimentales.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mostrar las herramientas existentes para la evaluación mecánica de las órtesis neuromusculares impresas en 3D como ser softwares y materiales, mediante los métodos computacionales.
- Identificar desafíos asociados con la producción de órtesis neuromusculares impresas en 3D, incluyendo aspectos a considerar como el rendimiento, durabilidad y adaptabilidad.
- Explorar recomendaciones de diseño para optimizar la ergonomía y personalización de las órtesis neuromusculares impresas en 3D, considerando la variabilidad de las necesidades de usuarios.
- Sintetizar los datos obtenidos de las evaluaciones computacionales y experimentales en un formato útil para poder proporcionar recomendaciones fundamentadas.

III. ESTADO DEL ARTE

3.1 ANTECEDENTES

3.1.1 HISTORIA DE LA ÓRTESIS Y PRÓTESIS

Los antiguos egipcios se destacaron como pioneros en el campo de la tecnología protésica, creando extremidades rudimentarias con fibras. Arqueólogos descubrieron un dedo del pie protésico funcional en una momia egipcia. Desde el año 424 a.C. hasta el 1a.C., en Capua, Italia, se desenterró una pierna artificial que data aproximadamente del 300 a.C. Esta prótesis, hecha de hierro, bronce y con un núcleo de madera, aparentemente pertenecía a alguien amputado por debajo de la rodilla. En el 424 a.C., Heródoto relató la historia de un vidente persa condenado a muerte que logró escapar amputándose el pie y reemplazándolo con una plantilla protésica de madera para caminar 30 millas (48.28km) hasta el próximo pueblo. Por otro lado, Plinio el Viejo, a quien le amputaron el brazo derecho, le colocaron una mano de hierro para sostener el escudo, permitiéndole regresar al campo de batalla. En la Alta Edad Media, que abarca desde el año 476-1000, se observaron pocos avances en la tecnología protésica, limitándose principalmente al uso de ganchos de mano y patas de palo (redaccion, 2021). En el Renacimiento (1400-1800), las prótesis se confeccionaban principalmente con hierro, acero, cobre y madera. A mediados y finales del siglo XVI, Ambroise Paré, un barbero y cirujano francés, es considerado pionero en cirugía de amputación y diseño protésico moderno. En los siglos XVII a XIX, se produjeron avances notables como la primera prótesis por debajo de la rodilla sin mecanismo de bloqueo, diseñada por Pieter Verduyn en 1696 (redaccion, 2021). En 1780, Jean-André Venel estableció la primera clínica ortopédica en Orbe, siendo pionera en el tratamiento integral de niños con deformaciones esqueléticas (*Historia y evolución de las órtesis*, 2022). En 1800, James Potts diseñó la "Pierna de Anglesey", una prótesis con una pierna de madera, articulación de rodilla de acero y pie articulado. En 1839, William Selpho introdujo la "Pierna Selpho" en los EE. UU., en 1846, Benjamin Palmer mejoró la pierna Selpho, eliminando espacios desagradables entre componentes y agregado un resorte anterior para un movimiento más natural (redaccion, 2021).

En 181, mientras trabajaba en un hospital en Haarlem, Antonius Mathijssen inventó el yeso ortopédico. Fue la primera persona en utilizar este material, descubriendo que, al mojarse con agua, el yeso se endurecía, logrando inmovilizar los huesos con precisión. Hugh Owen Thomas, conocido como el padre de la ortopedia en el Reino Unido, fue el creador de la "férula Thomas", el "collarín Thomas" y las órtesis para extremidades inferiores y cadera (*Historia y evolución de las órtesis*, 2022). El desarrollo continuó con la invención de la pierna anatómica Doctor Bly por Douglas Bly en 1863 y la sugerencia de Gustav Hermann en 1868 de usar aluminio en lugar de acero para hacer las extremidades artificiales más livianas. Sin embargo, el dispositivo más ligero de aluminio no se materializó hasta 1912, cuando Marcel Desoutter, un aviador inglés, elaboró la primera prótesis de aluminio con la ayuda de su hermano Charles (redaccion, 2021).

El especialista en ortopedia de Australia, Ronald Lawrie Huckstep, transformó la provisión de dispositivos ortopédicos para fracturas de extremidades. Fue el creador de la férula diseñada para tratar inflamaciones óseas y también desarrolló el conocido método de reparación de huesos fracturados llamado "Nail Huckstep" en 1967. En 1970, se creó la Academia Americana de Ortesistas y Protesistas con el fin de impulsar los logros científicos y educativos de los profesionales en el campo de O&P. Su objetivo principal era mejorar los estándares de atención al paciente mediante la promoción de la educación, literatura, la investigación, la defensa y la colaboración (*Historia y evolución de las órtesis*, 2022).

3.1.2 DESARROLLO DE LA IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D ha ocasionado un notable interés y, aunque no es un descubrimiento reciente, su aplicación ha tenido un crecimiento significativo en últimas décadas. Sus orígenes remontan a finales de los años ochenta, siendo Charles Hull reconocido como el inventor y pionero de la impresión tridimensional, pero fue en la década de los noventa cuando esta tecnología ganó relevancia en el ámbito médico. Aunque las impresoras digitales suelen emplear polímeros o plásticos para la fabricación de modelos, es importante señalar que existen impresoras capaces de trabajar con diversos materiales, incluyendo metales, nylon y geles biológicos (Heinze et al., 2020).

El avance tecnológico en la fabricación aditiva ha progresado en la forma en que aborda el diseño y la producción de órtesis neuromusculares. La impresión 3D es un proceso en el que se crean objetos tridimensionales mediante el uso de una impresora 3D. Este método implica la superposición sucesiva de capas del material elegido hasta complementar la pieza. A partir de un modelo 3D digital se fabrica un objeto físico que es una producción exacta y tangible del original. La impresión 3D requiere tanto de un software como de una impresora 3D equipada con los materiales correspondientes para su funcionamiento, implica la construcción de objetos tridimensionales mediante la superposición de capas, de abajo hacia arriba. Para llevar a cabo una impresión 3D, es esencial contar con un modelo digital de la pieza deseada y una herramienta de software para editar y preparar la pieza para la impresión. Además, se deben disponer de los materiales que se utilizarán en la impresora para crear la pieza, puede compararse con las impresoras convencionales, que requieren tinta para imprimir en una hoja (González, 2022).

Las primeras aplicaciones de la impresión 3D se centraron en campos como la ortopedia, la cirugía plástica y la odontología. Cabe mencionar, que, con el tiempo, esta técnica ha ampliado significativamente sus aplicaciones, demostrando utilidad en diversas especialidades médicas. Además, ha surgido como una opción atractiva desde el punto de vista económico en el ámbito de la salud, contribuyendo a la reducción de tiempos quirúrgicos y el número de días de hospitalización. Inicialmente, los modelos solían estar fabricados con materiales rígidos, careciendo de realismo y detalles anatómicos, pero la introducción de nuevas materias primas ha posibilitado la creación de modelos con materiales más elásticos, similares al tejido humano. Con la adición de colores y otros detalles, estos han alcanzado un alto grado de realismo (Heinze et al., 2020).

3.1.3 ESCANEADO Y PROCESAMIENTO DE MODELOS

Los modelos de anatómicos en 3D se generan típicamente a partir de imágenes médicas almacenadas en archivos DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine), obtenidas principalmente de tomografías computarizadas (CT), resonancias magnéticas (MR), angiografías y, en menor medida, ecografías (USG). También es factible crear modelos mediante programas

de diseño asistido por computadora (CAD). El procesamiento de estas imágenes implica el uso de software especializado, con diversas opciones disponibles, algunas gratuitas y otras que requiere licencia. Entre las más populares se encuentran Mimics (Materialise, Bélgica) (P. Hu et al., 2019), Compact View II (Optimum Solutions, Corea) y Blender (Blender Foundation, Holanda). Durante la etapa de "procesamiento" de imágenes, se busca retener únicamente las estructuras de interés, eliminando el resto. Este proceso, que puede ser laborioso, requiere personal capacitado, por lo que se recomienda la supervisión de radiólogos especializados (Heinze et al., 2020).

Figura 1. Proceso de impresión 3D.



Fuente: (Heinze et al., 2020).

Después de procesar las estructuras de interés, es necesario convertir los archivos a un formato apto para la impresión. Se utiliza comúnmente el lenguaje "STL" (Standard Tessellation Language), que es reconocido por las impresoras 3D. Este formato se caracteriza por emplear figuras geométricas, principalmente triángulos, para acabar completamente la superficie de los modelos (Heinze et al., 2020). Al incorporar los archivos STL al software modelado, se tiene la

capacidad de definir la porosidad necesaria o la estructura de soporte para el tratamiento clínico o la fabricación de las órtesis. Estos archivos STL, en esencia, consisten en numerosos planos bidimensionales, y al superponer estos planos, se crean los andamios tridimensionales requeridos (Su et al., 2021). Además el lenguaje STL está estandarizado para su utilización en microprocesadores programables de diversos fabricantes por eso mismo se considera una opción óptima en diferentes industrias (MITOV, 2019).

Algunos de los materiales que son utilizados comúnmente para la impresión en 3D de órtesis son:

- Polímeros termoplásticos

Entre ellos se encuentran el poliuretano termoplástico (TPU), el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y el poliácido láctico (PLA). Estos materiales, conocidos por su resistencia, durabilidad y buena relación entre fuerza y peso, son ampliamente utilizados en la impresión 3D (D.E.M.A, 2023).

El plástico PLA, aparte de ser biodegradable, presenta la capacidad de alterar sus propiedades al sumergirse en agua caliente. En este proceso se vuelve más flexible, lo que permite realizar ajustes directamente en la extremidad del paciente, siguiendo una metodología similar al método tradicional que emplea termoplásticos de baja temperatura, además que ofrece una ventaja adicional al ser un material de bajo costo (*Impresión 3D para hacer órtesis*, 2020)

El TPU es un elastómero altamente flexible y duradero que supera a materiales como el PLA y ABS en resistencia a fuerzas de compresión y tracción. Su adaptabilidad se debe a la presencia de secuencias alternas de segmentos duros y blandos en su composición química, lo que permite ajustar la dureza y flexibilidad del material (M, 2023a).

El ABS es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales, destaca por su notable resistencia al impacto, especialmente a bajas temperaturas, y por la capacidad de producir piezas ligeras (C, 2022).

- Resinas fotopolimerizables

Utilizadas en impresoras 3D de resina, son líquidos que se solidifican mediante luz ultravioleta, ofreciendo alta precisión y detalles finos en las prótesis impresas en 3D (D.E.M.A, 2023).

- Nylon

Es un material popular debido a su combinación de resistencia, flexibilidad y durabilidad, siendo una elección común para implantes de extremidades inferiores (D.E.M.A, 2023).

- Policaprolactona (PCL)

También en investigaciones recientes, decidieron analizar materiales no considerados como ser el PCL, que es un poliéster semicristalino biocompatible y biodegradable, disponible como materia prima para la tecnología de fabricación aditiva, particularmente en procesos de extrusión de materiales (Popescu, Stochioiu, et al., 2023).

- Poli tereftalato de etilenglicol (PETG)

Exhiben propiedades mecánicas más destacadas en cuanto al módulo elástico y alargamiento a la rotura, presentan una mayor capacidad de absorción de energía. Al ser impreso 3D, muestra una mejor calidad superficial con una interfaz fibra-fibra más uniforme (Ronca et al., 2022).

En cuanto a métodos de impresión, de los que más se utilizan para las impresiones 3D en órtesis son:

- El método de modelado por deposición fundida (FDM) que implica la extrusión de un filamento de plástico a través de una boquilla calentada para depositar capas y formar una estructura tridimensional. Los materiales utilizados se limitan generalmente a filamentos termoplásticos convencionales como PLA o ABS. La impresión FDM es una técnica de prototipado ampliamente utilizada y económica, además permite la creación de plantillas completamente personalizadas desde el punto de vista geométrico (Hudak et al., 2022).

- La estereolitografía (SLA)

Es un método de fabricación aditiva que utiliza luz y una resina fotosensible para producir piezas con una precisión y exactitud sobresalientes (Garrido Sánchez, 2019).

- Sinterizado selectivo por láser (SLS)

Implica la creación de piezas a través de la sinterización de capas de polvo, puede variar de plásticos hasta metales, proporciona piezas terminadas listas para uso inmediato, lo que hay

llevado a su gradual adopción en el sector de la medicina y fabricación de prótesis y órtesis (Olavarría Lepe, 2019).

3.1.4 INVESTIGACIONES DESTACADAS

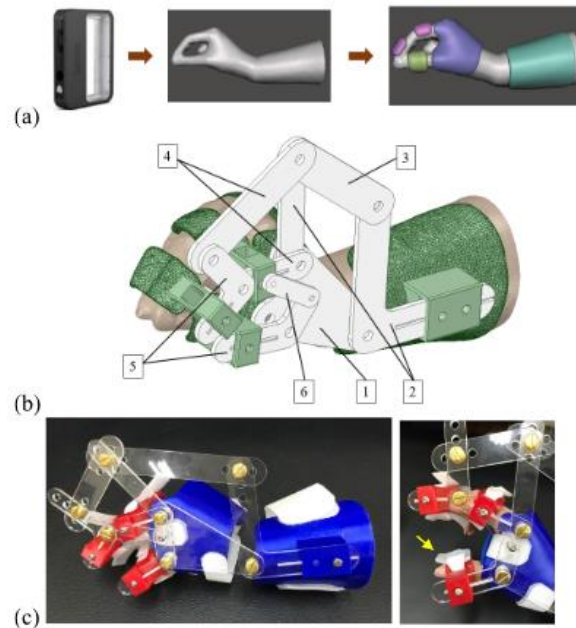
La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, presenta una ventaja distintiva y valiosa al permitir la producción de estructuras topológicas complejas, como por ejemplo estructuras porosas, retículas y construcciones similares que son imposibles de crear mediante procesos de fabricación tradicionales como el mecanizado sustractivo y la fundición (F. Hu & Wu, 2019).

El avance rápido de las tecnologías de fabricación aditiva ha reducido de manera significativa el tiempo necesario para implementar un nuevo producto. Estos procesos permiten obtener de formas físicas en 3D de casi cualquier complejidad directamente a partir de la representación digital del producto, generalmente un modelo creado en un sistema de diseño asistido por ordenador (CAD). Estas tecnologías son especialmente utilizadas para la rápida fabricación de prototipos físicos de piezas diseñadas, lo cual es crucial, en particular, en el campo de la medicina (Górski et al., 2020).

En el estudio de Yeh et al., (2023) diseñaron e implementaron una órtesis de muñeca mediante impresión 3D con el objetivo de mejorar la capacidad de agarre en individuos con lesiones en la médula espinal cervical. La evaluación realizada con ocho participantes reveló un incremento significativo tanto en la fuerza de pellizco como en la destreza manual después de utilizar la órtesis. Aunque el dispositivo demostró beneficios en términos de agarre y destreza, se resalta la necesidad de investigaciones adicionales para determinar su utilidad en actividades cotidianas. Los pacientes con lesiones en la médula espinal cervical pueden realizar tareas de agarre y pellizco mediante un agarre tenodesico, las órtesis impresas en 3D ofrecen soporte a los dedos para mejorar estas funciones. Se pueden personalizar según el tamaño de la mano, se controlan mediante el músculo extensor de la muñeca, la órtesis utiliza un diseño de cuatro barras para simular el movimiento de la mano, se escanea una mano real para adaptar la forma de la

órtesis, se prefabrican diferentes tamaños según el ancho de la palma, se agregan capuchones de silicona para aumentar la fricción durante el agarre, el dispositivo se imprime en 3D y se ajusta a cada participante, donde el resultado pesa aproximadamente 202g (Yeh et al., 2023).

Figura 2. Órtesis de mano impresa en 3D para mejorar la función de la mano en pacientes con lesión en la médula espinal.

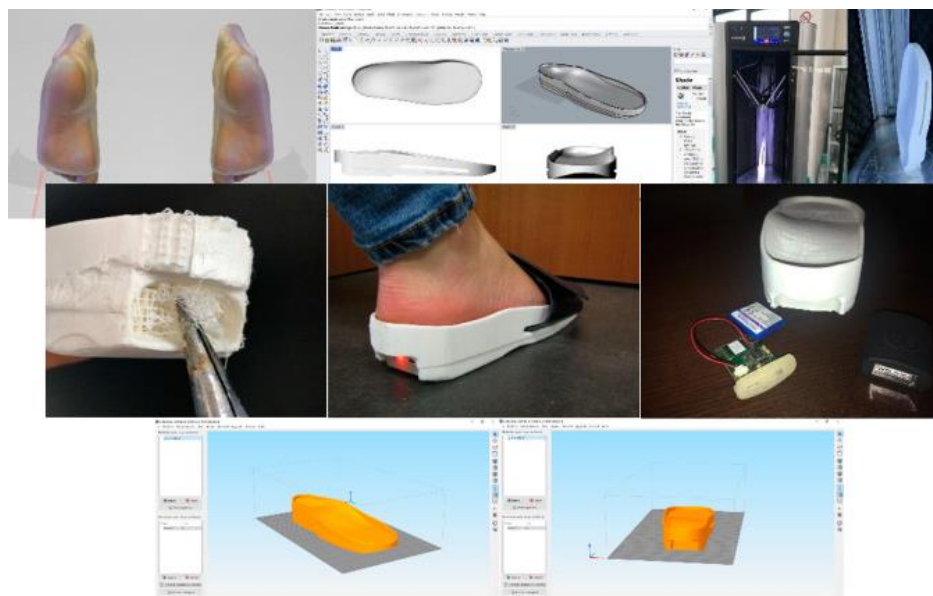


Fuente: (Yeh et al., 2023).

En este estudio, se evaluó una órtesis de mano controlada por la muñeca fabricada mediante impresión 3D con el propósito de mejorar la funcionalidad de la mano en individuos con lesiones en la médula espinal cervical, se observaron mejoras en la fuerza de pellizco y la destreza manual. Se destacó la limitación del tamaño de la muestra y la duración del seguimiento, que fue solo de 2 semanas, se sugirió la necesidad de realizar investigaciones futuras con muestras más amplias y períodos de seguimiento a más largo plazo, además de que este diseño está orientado a movimientos específicos, entonces que en investigaciones futuras deberían explorar otros tipos de agarre (Yeh et al., 2023).

En la práctica clínica, se requiere una personalización específica para abordar las patologías del pie, las cuales deben adaptarse tanto a la enfermedad como al paciente. Considerando los posibles escenarios en los que se trate de una discapacidad, en el ámbito de la rehabilitación de la orientación y movilidad (O&M) de personas con discapacidad, los parámetros posturales es de particular importancia, permitiéndoles a los profesionales de la rehabilitación analizar el desempeño y mejoras en la movilidad independiente de los individuos (Reyes Leiva et al., 2023). Hasta ahora, los métodos convencionales para la creación de órtesis de pie personalizadas y funcionales se basan en el uso de yeso y técnicas de fabricación manual, esto implica que la terapia ortopédica depende completamente de las habilidades y la experiencia de los profesionales individuales. En el siguiente estudio de (Brognara et al., 2022), se realiza una viabilidad de una órtesis de pie y casa sensorizada por impresión 3D, se enfoca en 3 partes, principalmente se compara el escaneo 3D del pie con el método tradicional de yeso para la obtención de datos específicos del paciente, luego se desarrolla inicialmente un flujo de trabajo de modelado de diseño generativo para idear un proceso que facilite la creación de formas personalizadas de manera sencilla, permitiendo al usuario final (el podólogo) personalizar interactivamente las órtesis, y por último se lleva a cabo una evaluación comparativa entre distintos materiales de impresión con el objetivo de replicar el mismo comportamiento mecánico exhibido por las órtesis estándar (Brognara et al., 2022).

Figura 3. Pasos clave para el modelado de la zapatilla.



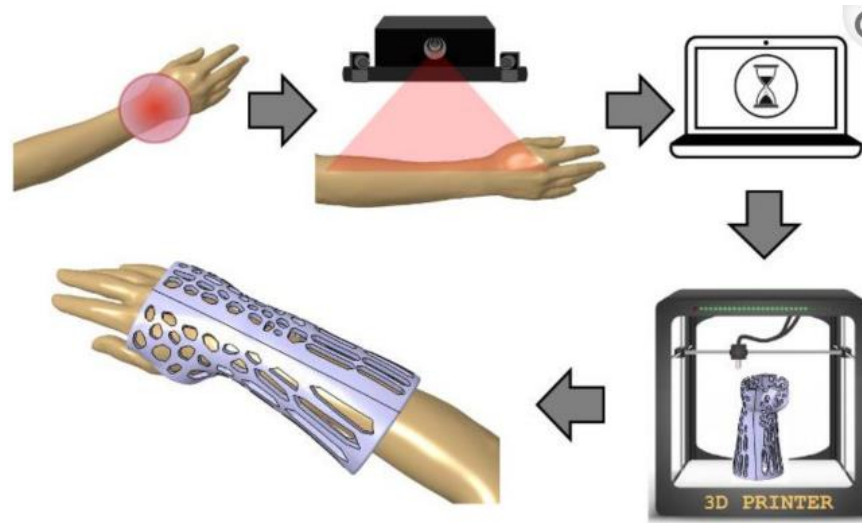
Fuente: (Brognara et al., 2022).

En relación con el proceso de escaneo 3D, se evidencia que este método de adquisición es más preciso al requerir que el paciente se encuentre relajado y su pie este firmemente fijado en la posición neutral, en comparación con el escaneo 3D del pie sin sistema de bloqueo y utilizando un escáner 3D manual. En cuanto a la impresión, se destaca que la elección de materiales poliméricos tiene un impacto significativo en las propiedades mecánicas, lo que implica una cuidadosa evaluación por parte del profesional clínico. Asimismo, se señala que direcciones de carga de diferentes modelos impresos en 3D, pueden reaccionar de manera desigual. Es esencial llevar a cabo pruebas adicionales en diversas direcciones de impresión y condiciones de carga para determinar qué materiales son más adecuados para las actividades diarias y las necesidades médicas, se sugiere realizar más pruebas con diferentes materiales, tanto flexibles como rígidos, para encontrar opciones más eficaces (Brognara et al., 2022).

En el estudio Górski et al., (2020) se menciona que las órtesis de muñeca-mano son común en todo el mundo, especialmente debido a la prevalencia de lesiones en la muñeca, que presentan alrededor del 25% de fracturas en la población pediátrica y hasta el 18% en personas mayores, este artículo se centra en la impresión 3D de órtesis de muñeca-mano con estructuras caladas, un

enfoque popularizado por el diseño de Jake Evill. Aunque existen varios diseños disponibles, como XKelet, Osteoid y otros, la literatura actual carece de investigaciones sobre la selección óptima de materiales y parámetros de proceso para lograr resultados ideales en resistencia, ajuste, calidad de la superficie, facilidad de uso, costos y tiempo, especialmente en el contexto de órtesis diseñadas de manera automática. Se evaluaron 4 materiales que fueron PLA, ABS, Nylon y Poliestireno de Alto Impacto (HIPS). En todas las órtesis producidas, fue factible unir dos partes de la órtesis inmediatamente después de la fabricación, a excepción de las órtesis de nylon, que requerían un ligero procedimiento de rectificado manual antes de su montaje. Todas las órtesis fabricadas y ensambladas fueron sometidas a pruebas por parte del paciente, y todas resultaron adecuadas, sin que ninguna fuera rechazada por este motivo. En cuanto a los materiales, el PLA destaca como el más resistente en términos de promedio, el nylon se sitúa como el segundo material más cercano, le sigue ABS y por último HIPS. Se revelan resultados en los que las órtesis de ABS experimentan una disminución del 50% en su resistencia cuando se fabrican verticalmente en lugar de horizontalmente, reaccionando de la misma manera el HIPS. Esto puede atribuirse a la baja resistencia de adherencia entre capas en las órtesis hechas con estos materiales, ya que los fallos en la orientación vertical se deben principalmente a la separación de capas, el cual se considera como un fenómeno equiparable al agrietamiento frágil en productos monolíticos (Górski et al., 2020).

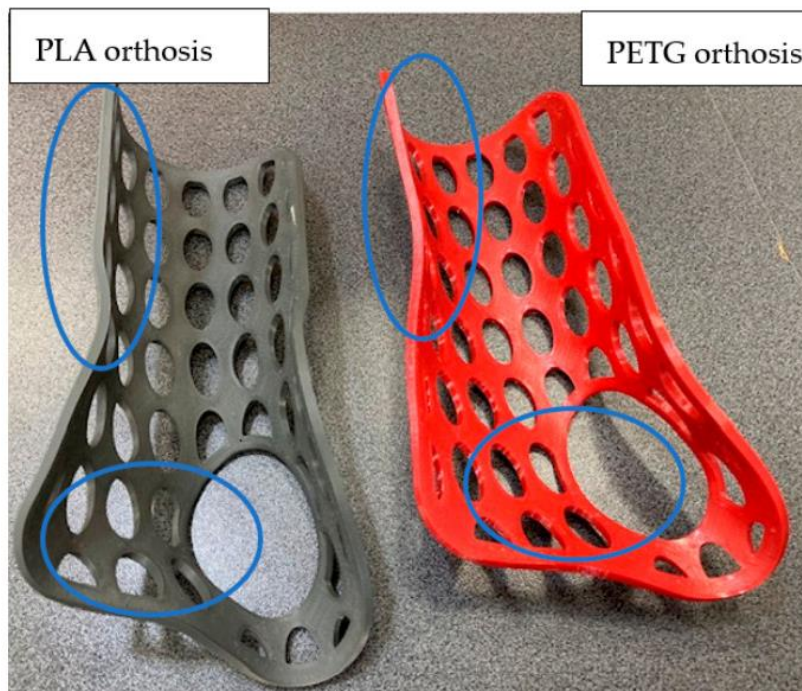
Figura 4. Esquema de trabajo propuesto.



Fuente:(Górski et al., 2020).

Los resultados han evidenciado la factibilidad de obtener una órtesis de mano calada impresa en 3D, utilizable y económica, en menos de un día de trabajo, desde la medición hasta un producto listo, asimismo se concluyó que el PLA es un material adecuado para fabricar productos médicos mediante impresión 3D, manteniendo consideraciones ambientales (Górski et al., 2020). También hay estudios que consideran usar lo que es el termoformado de láminas de material polimérico que es una técnica industrial convencional para producir una variedad de objetos con formas complejas, se lleva a cabo aplicando fuerza mecánica al material calentado y utilizando herramientas de conformado como moldes. A pesar de que tiene aplicaciones amplias, este método no se utiliza de manera habitual en la conformación de piezas delgadas impresas en 3D, fabricadas con materiales poliméricos, aun teniendo posibles aplicaciones interesantes (Popescu, Baciú, et al., 2023).

Figura 5. Órtesis de muñeca-mano impresas en 3D hechas de PLA y Pet-G.



Fuente: (Popescu, Baciú, et al., 2023).

El termoformado de láminas de PLA impresas en 3D es viable debido a las propiedades elásticas del material por encima de su T_g . El proceso implica calentamiento para volver el material maleable, moldeado donde las cadenas poliméricas se alinean, y enfriamiento para solidificar la forma deseada. En objetos delgados como órtesis, características como el patrón de relleno y la densidad pueden afectar el tiempo de maleabilidad y enfriamiento, siendo necesarios estudios adicionales (Popescu, Baciú, et al., 2023).

Así como hay estudios de diseño de órtesis, hay otros en los que su objetivo va más allá de lo superficial, como lo fue en el de Kermen & Mohammadi, (2021), el cual se enfocan en la aplicación de órtesis en el ámbito de atención médica para abordar anomalías en los pies. Es esencial que los profesionales médicos posean un conocimiento profundo sobre las propiedades y características de los materiales utilizados en las órtesis, a fin de tomar decisiones fundamentales. La investigación de este campo ha empleado diversas técnicas de prueba, con el propósito de evaluar las propiedades de los materiales empleados en órtesis. El proceso de recetar

plantillas para zapatos generalmente implica que los profesionales de salud utilicen el procedimiento tridimensional de toma de impresiones para moldear el pie de cada paciente, esto ayuda a identificar áreas de presión plantar excesiva al tiempo que proporciona estabilización y apoyo para las articulaciones del pie. Se realizaron metodologías simuladas de prueba en zapato y de banco, estas tienen limitaciones ya que no abarcan todos los factores que contribuyen a la efectividad de un material. En cuanto a los elementos finitos, este ha llevado a los profesionales a enfocarse en el diseño en lugar de los materiales utilizados. Estas herramientas de software son más accesibles que los sistemas de medición en zapato y permiten realizar pruebas rápidas sin la necesidad de tener al paciente presente. Se menciona la necesidad de más investigaciones en la industria del calzado para probar la durabilidad y viabilidad de nuevos materiales (Kermen & Mohammadi, 2021).

3.2 PROBLEMÁTICA

Las órtesis neuromusculares deben combinar las mejores propiedades de resistencia disponibles con la ligereza necesaria para garantizar un uso cómodo. Además, se busca minimizar el tiempo de fabricación de la órtesis para que el producto final esté listo en pocas horas desde que se realiza el escaneo de la extremidad del paciente (Łukaszewski et al., 2023). Cabe mencionar que aún existen profesionales que consideran seguir el método tradicional el cual toma más tiempo tanto de fabricación como de recuperación para el paciente, esto se da ya sea por la falta del equipo apropiado en el centro o de recursos.

La impresión 3D posibilita la rentabilidad de la personalización del producto, abriendo así una ventana de oportunidad para la innovación (Yan et al., 2020). Es un proceso de fabricación en el cual los materiales se fusionan capa por capa para construir un objeto a partir de un modelo digital, tiene el potencial de eliminar múltiples etapas vinculadas a los métodos convencionales de fabricación de órtesis. Al posibilitar la libertad de diseño, la impresión 3D facilita la desviación de diseño y, en consecuencia, permite el desarrollo de órtesis específicas para cada paciente (Wojciechowski et al., 2019). Esta técnica que es considerada destacadamente en el sector salud tiene varias ventajas sobre el método tradicional, entre las cuales están que no necesita la

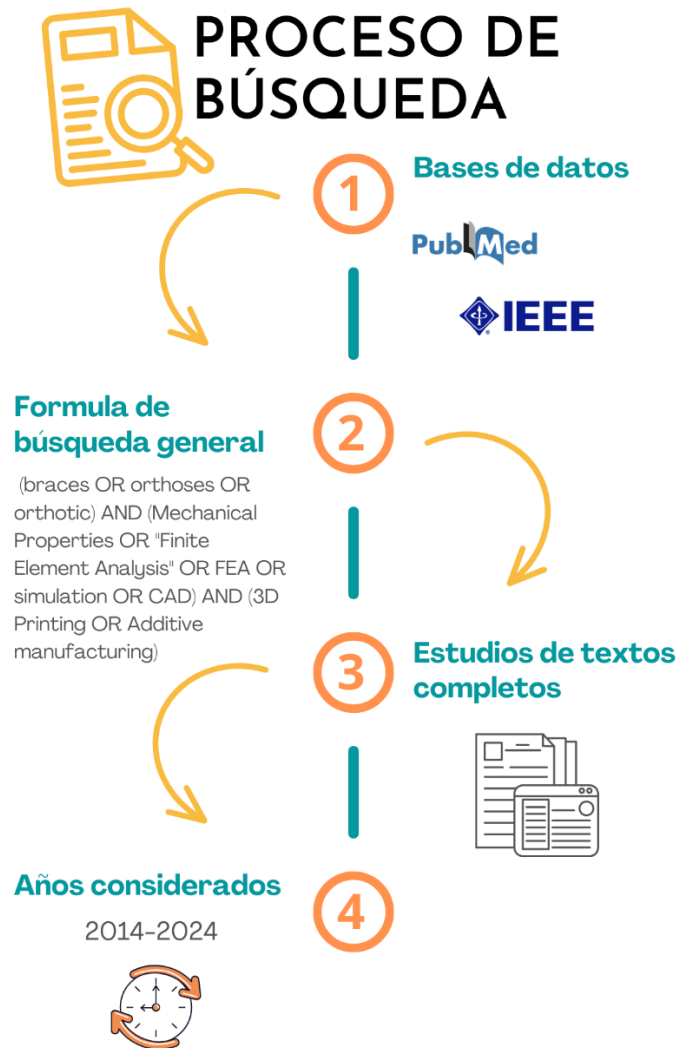
presencia del paciente para la creación del modelo, además de que puede personalizar los diseños para que pueda satisfacer las necesidades de cada enfermedad que se presente.

Hay más estudios que se enfocan en el diseño de las órtesis (Gil et al., 2018), en lugar de considerar la base de estos mismos, que son los materiales en los cuales se deben enfocar, que proporcionen duración, comodidad y estabilidad al paciente. En muy pocos se ve evidencia por qué escogieron dicho material o método, raramente se explica las ventajas o beneficios de este, incluso hay estudios incompletos, donde solo se toman en cuenta tres materiales, siendo estos los más comunes.

Existe un método que se está utilizando últimamente, que es el FEA el cual permite la creación de simulaciones numéricas en diversos ámbitos médicos con el objetivo de proponer nuevos modelos o métodos experimentales para el tratamiento de diversas enfermedades. Esta tecnología permite simular un comportamiento mecánico realista, así como la propiedades correspondientes de los materiales, haciendo que haya reducción de costos experimentales y del tiempo necesario para desarrollar nuevos modelos (Gozar et al., 2018). Da una idea de lo que se quiere explicar de forma física al paciente, siendo las órtesis en este caso, no brinda resultados reales, ósea que ya hayan sido probados, pero si da libertad de diseño y prueba.

Las órtesis impresas en 3D no han sido completamente evaluadas, los estudios que hay tiene varias limitantes, ya sea de tiempo o de pocos elementos evaluados, los profesionales toman mínimo interés en el análisis de sus materiales, en especial con la impresión tridimensional, algunas veces se consideran métodos diversos, pero la mayoría de los estudios solo se enfoca en los tradicionales, debiendo intentar probar otras maneras.

3.3 IMAGEN INTEGRADORA



3.3 TABLA DE LIMITACIONES

En los estudios recopilados, se encuentran distintas limitaciones que impiden que haya resultados eficientes y concretos en cuanto a la definición de los materiales óptimos para las órtesis neuromusculares impresas en 3D.

Tabla 1. Tabla de limitaciones

Limitación General	Descripción	Tipo de órtesis neuromuscular	Artículo
Tamaño de la órtesis y poco tiempo de prueba	Este estudio examinó el rendimiento de una órtesis de muñeca fabricada mediante impresión 3D con el objetivo de mejorar la funcionalidad de la mano en individuos con lesiones en la médula espinal cervical, a pesar de observarse mejorías en la fuerza de pellizco y la destreza manual, se hizo hincapié en la limitación del tamaño de la muestra y en el breve periodo de seguimiento de solo 2 semanas. Se recomendó la realización de investigaciones futuras con muestras más extensas y a lo largo de un periodo más prolongado, además de contemplar otros tipos de agarre.	Órtesis de muñeca	(Yeh et al., 2023)
Escasa información de materiales y poca disponibilidad de	Este estudio evalúa materiales para la impresión 3D de un corsé ortopédico para la espalda, donde se menciona que es un desafío	Órtesis de columna vertebral	(Ronca et al., 2022)
Limitación General	Descripción	Tipo de órtesis neuromuscular	Artículo

<p>tecnología para impresiones grandes</p>	<p>considerable, la mayoría de las impresiones 3D disponibles actualmente cuentan con cámaras de impresión de dimensiones reducidas, lo que limita el tamaño de las piezas a imprimir, lo que se considera hacer es la impresión por partes y luego unirlos. No definieron un material eficiente, en este caso, solo se espera que estas limitaciones se superen con el desarrollo continuo de la tecnología y la innovación de los materiales.</p>		
<p>Uso de material indefinido</p>	<p>En esta investigación se examinaron las propiedades mecánicas de la policaprolactona (PCL) el cual es un material utilizado para en fabricación aditiva mediante extrusión. Se realizaron diversas pruebas, las cuales eran favorecedoras, sin embargo, al termoformar las muestras, el resultado era infructuoso, además del patrón de</p>	<p>Órtesis de muñeca-mano</p>	<p>(Popescu, Stochioiu, et al., 2023)</p>

Limitación General	Descripción	Tipo de órtesis neuromuscular	Artículo
	relleno que no mostró muestra significativa en las propiedades mecánicas del material y la prueba de exposición a rayos UV-B demostró tener un impacto negativo en la resistencia de este.		
Sin claridad en la definición del material adecuado	El enfoque central de la tesis gira en torno a la prescripción de órtesis para individuos con irregularidades en los pies, para la cual se incluyen impresiones tridimensionales para moldear el pie del paciente. Aunque existen variedad de materiales y grosores disponibles, no hay una orientación clara sobre la selección de materiales para casos específicos.	Órtesis de anomalías generalizadas en pie	(Kermen & Mohammadi, 2021)

IV. METODOLOGÍA

La metodología muestra el proceso que se llevó a cabo para poder realizar la investigación de la mejor, lo que hace que sea un aspecto importante que describir, se destacó en cuanto a:

4.1 ENFOQUE

La revisión tiene una integración de enfoques, tanto cualitativo como cuantitativo. Tiene un enfoque cualitativo ya que recopila datos sobre la adaptabilidad de las órtesis a diferentes casos clínicos y un enfoque cuantitativo porque recopila datos objetivos sobre la eficacia biomecánica de las órtesis en diferentes contextos, y se considera una integración de enfoques porque se comparan resultados cualitativos y cuantitativos para obtener una comprensión más completa de las órtesis neuromusculares impresas en 3D, además de identificar áreas de mejora basada en los resultados.

4.2 OBJETO DE INVESTIGACIÓN

La revisión se centra en examinar las órtesis neuromusculares impresas en 3D, los cuales son dispositivos diseñados para brindar apoyo y mejorar la funcionalidad neuromuscular en pacientes con diversas condiciones médicas. Además, se enfoca en la evaluación detallada de las propiedades mecánicas de dichas órtesis, abordando aspectos como la resistencia, durabilidad y adaptabilidad biomecánica, se empleará tanto métodos computacionales como experimentales.

Los aspectos clave a considerar en la revisión de artículos son:

- **Materiales de impresión 3D**
Se exploran los diferentes materiales utilizados en la impresión 3D de órtesis neuromusculares, teniendo en cuenta sus características mecánicas y adecuación para aplicaciones clínicas.
- **Método de impresión 3D**
Se analiza la influencia del método de impresión 3D en las propiedades mecánicas de las órtesis neuromusculares.
- **Diseño geométrico**
Se explora la influencia de diseño geométrico de las órtesis en sus propiedades mecánicas, considerando factores como la forma.
- **Evaluación computacional**

Se utilizan algunos estudios de elementos finitos, donde se describe el comportamiento mecánico de las órtesis en diversas condiciones.

- Validación de la eficacia de las órtesis

Se analizan cómo las órtesis responden a condiciones biomecánicas específicas, según los artículos seleccionados, garantizando una adaptabilidad óptima las necesidades del usuario.

- Comparación con la literatura

Al tener los datos completos, se contextualizan los resultados y se comparan con investigaciones previas.

4.4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1 MÉTODO DE BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA

Se realizaron búsquedas bibliográficas en las bases de datos IEEE Xplore (IE) y PubMed. Teniendo en cuenta los rápidos avances tecnológicos, nos centramos en los artículos publicados en los últimos 10 años (hasta febrero de 2024) para dar una visión general de los desarrollos más recientes. Las búsquedas se realizaron en IE y PubMed el 7 de febrero de 2024. Solo se consideraron artículos escritos en inglés. El cribado se filtró en una etapa: una búsqueda general. Los términos utilizados en la búsqueda general fueron (braces OR orthoses OR orthotic) AND (Mechanical Properties OR "Finite Element Analysis" OR FEA OR simulation OR CAD) AND (3D Printing OR Additive manufacturing).

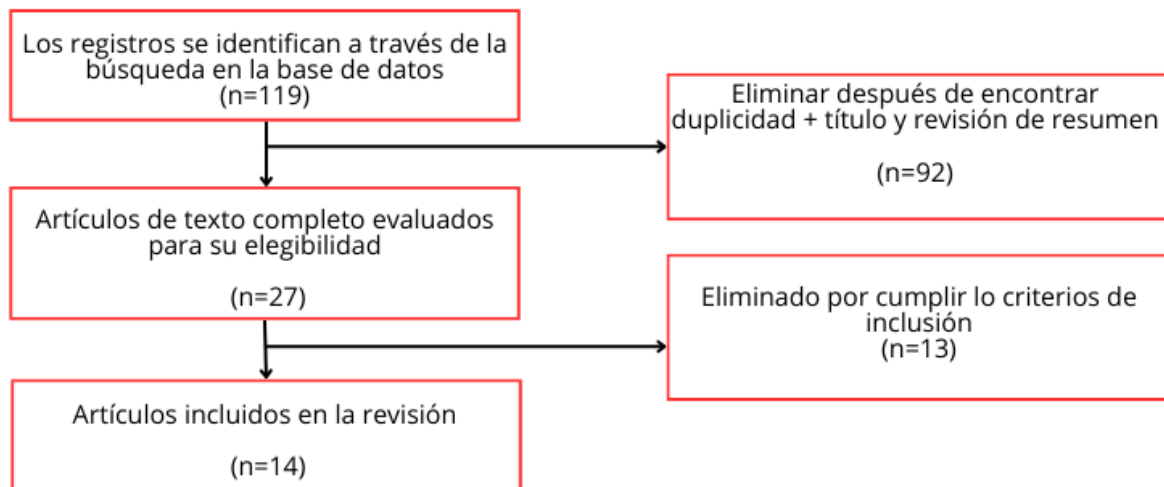
4.4.2 CRITERIOS DE ADMISIBILIDAD

Para la selección de los artículos incluidos en esta revisión se utilizaron los siguientes criterios: (1) artículos de órtesis neuromusculares, ya sea de mano, muñeca, cabeza, columna vertebral o de tobillo-pie (AFO), (2) impresas en 3D, (3) que describan el sistema digital de simulación o análisis de propiedades mecánicas mediante simulaciones o métodos computacionales.

4.4.3 CRITERIOS DE INCLUSIÓN

La búsqueda inicial dio como resultado 122 artículos (IEEE = 30, PubMed = 92). Para ser incluido en esta revisión, se requería que el objetivo de un artículo fueran órtesis neuromusculares impresas en 3D; se excluyeron los artículos sobre órtesis oclusales. Después de aplicar los criterios de selección y eliminar duplicados, y demás filtros, quedaron 14 artículos por revisar (Figura 6).

Figura 6. Proceso de selección de artículos de análisis profundo después de la búsqueda en la base de datos.



Fuente: Elaboración propia.

V. RESULTADOS

Se muestran los resultados obtenidos, se describen brevemente los artículos seleccionados, asimismo se dividen según su tipo de órtesis, además de la cantidad de artículos que había en cada uno:

Los artículos fueron resumidos y divididos en una categoría de acuerdo con los distintos tipos de órtesis neuromusculares. En la primera sección se analizan seis artículos que se informa sobre órtesis de muñeca-mano (WHO, por sus siglas en ingles), en la segunda sección se consideran cinco artículos que describen las órtesis de columna vertebral y en la tercera sección se informa sobre tres artículos que describen las órtesis de AFO.

A continuación, se discute la usabilidad, las tendencias de aplicación y la incorporación a diversas metodologías en los artículos revisados.

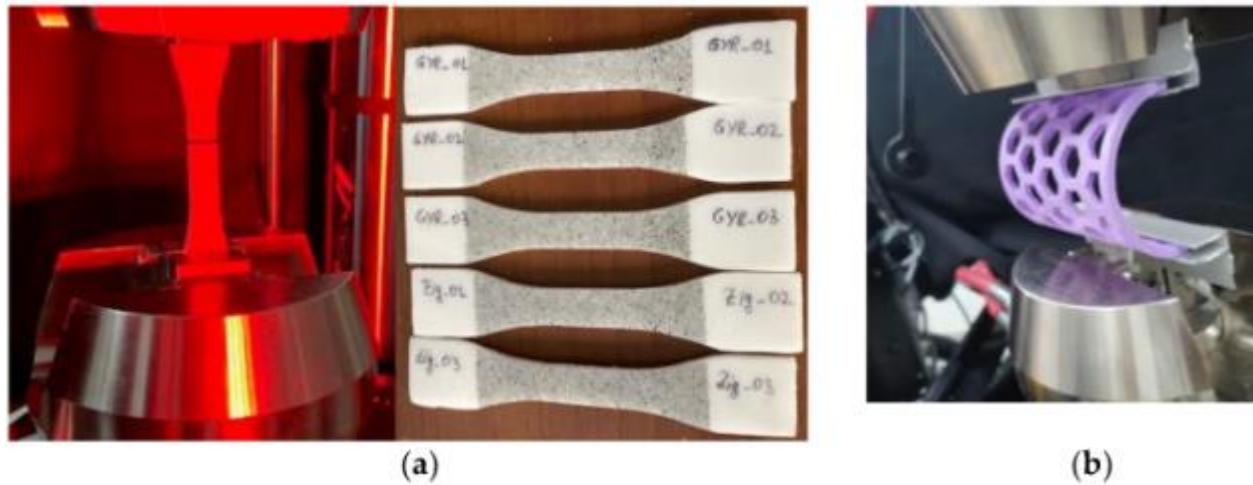
5.1 WHO

El 43% de los artículos revisados reportaron el uso de órtesis de muñeca mano. Las WHO desempeñan un papel crucial como dispositivo médico externo diseñado para proporcionar apoyo a la muñeca y la mano durante el tratamiento de diversas afecciones de las extremidades superiores, como fracturas, esguinces y lesiones. Estos dispositivos ofrecen estabilidad, rigidez y posicionamiento adecuado, se utilizan tanto en niños como en adultos debido a su diseño ligero y transpirable. La construcción de estas órtesis implica el uso de materiales textiles, velcro y plásticos, lo que favorece la transpirabilidad, el control de la humedad y la comodidad (Łukaszewski et al., 2023).

Popescu, Stochioiu, et al., (2023) determinaron las propiedades del policaprolactona (PCL), el cual es un poliéster semicristalino biocompatible y biodegradable. Utilizaron probetas de tracción y flexión como muestras además de las muestras semicilíndricas que imitan la forma del antebrazo. El patrón de relleno en las características mecánicas, así como el efecto de la exposición de los rayos UV-B en el rendimiento mecánico, fueron consideraciones para evaluar la idoneidad de la impresión 3D para la producción de órtesis personalizadas y también termoformadas siendo estas las que requieren menos tiempo de impresión. Su método impresión fue FDM (Modelado por Deposición fundida) en conjunto con el software Cura Ultimaker (Ultimaker BV, Utrecht, Países Bajos).

La evaluación mecánica de las muestras de PCL fabricadas mediante impresión 3D destacó la consistencia del proceso de fabricación en términos de comportamiento mecánico. Además, se observó una estabilidad dimensional definida en las piezas de PCL al medir las dimensiones después de la impresión 3D y la exposición a los rayos UV-B, comparando estos resultados con los valores nominales. Aunque el diseño de relleno no tuvo impacto significativo en las propiedades mecánicas, se encontró que un periodo breve de exposición a los rayos UV-B tuvo un efecto adverso significativo en la resistencia a la tracción de las muestras.

Figura 7. Montaje de las probetas y muestras propuestas por (Popescu, Stochioiu, et al., 2023).

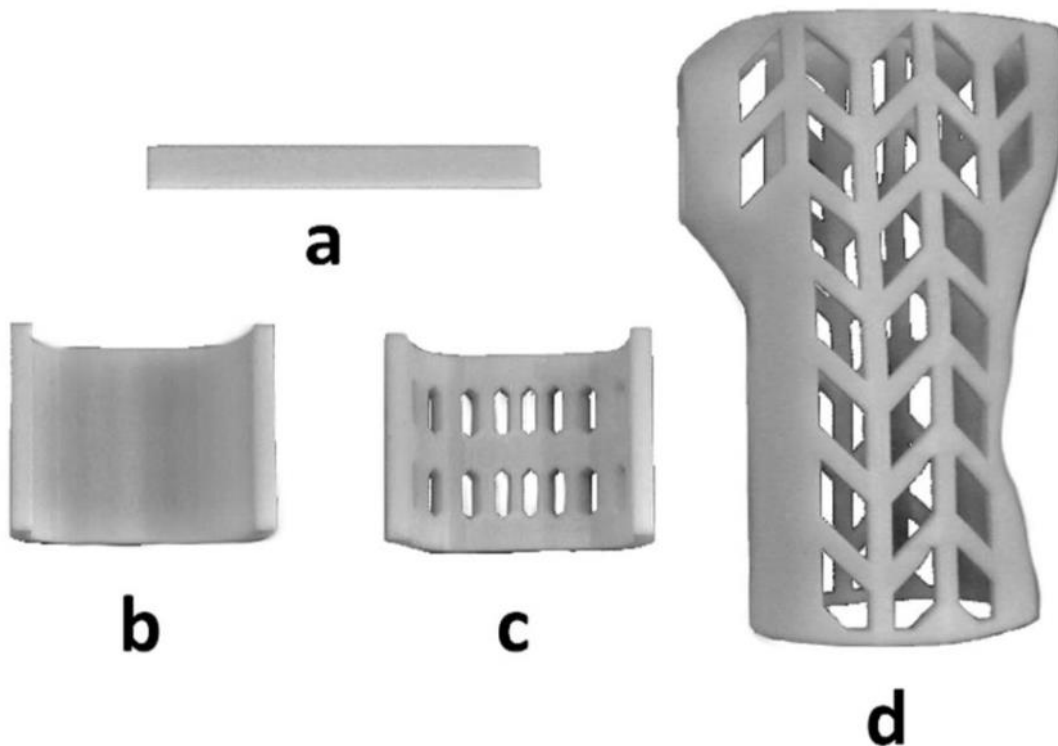


Montajes de ensayos mecánicos: tracción (a); Flexión de las muestras semicilíndricas (b).

En el trabajo Łukaszewski et al., (2020) hacen énfasis en WHO, las cuales se producen por fabricación aditiva mediante el método fabricación de filamentos fundidos (FFF). El material utilizado fue el ABS, las muestras estandarizadas, la muestra de un fragmento de la órtesis y la órtesis completa, fueron hechas con una impresora de bajo presupuesto. Se llevaron a cabo muestras experimentales en una máquina de ensayos universales para todos los tipos de muestra, lo que permitió la evaluación del módulo de elasticidad de los materiales fabricados mediante la comparación con modelos de simulación utilizando el FEA en el entorno de ABAQUS.

Los resultados presentados en el artículo evidencian que al procesar material mediante la técnica de impresión 3D en el mismo dispositivo, se logra una repetibilidad adecuada en las propiedades mecánicas de los productos resultantes, esto sugiere que el proceso es consistente, y así, permite la aplicación de la simulación numérica para estimar las propiedades de resistencia en productos con geometría similar.

Figura 8. Muestras impresas propuestas por (Łukaszewski et al., 2020).



Górski et al. (2020) establecen un diseño automatizado junto a parámetros fiables para una rápida y asequible fabricación de órtesis utilizables e impresas en 3D, se enfoca principalmente en WHO. Las órtesis están compuestas por dos secciones (divididas horizontalmente) que se conecta a través de un mecanismo de ajuste a presión, que consiste en ranuras y estrías, además presenta una estructura ligera y calada. El software utilizado fue el Autodesk Inventor y se realizó prueba con cuatro materiales que son el PLA, ABS, HIPS y Nylon. La fabricación se realizó de acuerdo con lo planeado y se obtuvo el juego completo de órtesis, sin problemas importantes de estabilidad durante el proceso.

Los resultados fueron prometedores, se demostró la realización de una WHO de buena calidad mediante impresión 3D, además de los criterios de resistencia que no hay que descartarlos, los únicos que no se cumplieron fueron los criterios económicos. Una observación que destaca en este artículo es que describe y define cada material, tanto sus ventajas como

desventajas, en este caso se definió el PLA como el mejor, entre los seleccionados a prueba, en cuanto a resistencia y agradable al ambiente.

Figura 9. Órtesis fabricadas verticalmente a partir de PLA propuestas por (Górski et al., 2020).



También hay estudios que van más allá de lo cotidiano, como Łukaszewski et al., (2023) quienes analizaron la resistencia mecánica de las órtesis de una WHO con PET-G, un material poco utilizado en la industria. Se llevaron a cabo pruebas experimentales y simulaciones para evaluar las propiedades de las órtesis fabricadas mediante el proceso de MEX (proceso de extrusión de materiales), el cual también es un término para el FDM. Utiliza una metodología similar a la de un artículo anteriormente descrito, en la cual producen muestras estándar de flexión utilizando filamento PET-G en una impresora de bajo costo, abarcando fragmentos ortopédicos y órtesis completas, las pruebas experimentales se llevaron a cabo mediante una máquina de pruebas universales, y los resultados se compararon con lo de un modelo de simulación de elementos finitos creado en el entorno de ABAQUS. Se discute que se utilizaron distintas combinaciones de temperatura y velocidad de impresión para las muestras fabricadas, se confirmó que, entre más alta la temperatura y la extrusión, dan como resultado un aumento de peso, esto lo respalda las mediciones de densidad y peso.

Hay casos en los que puede resultar un tanto difícil fabricar la órtesis, Thomann & de Carvalho, (2021) desarrollaron una metodología de diseño para la creación de una órtesis dinámica de

extremidades superiores para niños. Tomaron una estrategia de combinar las tecnologías Microsoft Kinect y Leap Motion con juegos para poder identificar las habilidades del usuario y así crearle una órtesis personalizada de material PLA certificado por especialistas. Llevo tiempo y varios prototipos, pero al final pudo fabricar una órtesis dinámica con un peso de solo 67g, la cual cumple con las especificaciones técnicas.

Li & Tanaka, (2018) desarrollaron un modelo paramétrico como generador de órtesis impresas en 3D, utilizando el software Rhino 3D, se podría decir que es un estudio guía, ya que menciona que es para un usuario sin experiencia. Efectivamente comprobado, fue evaluado con 5 participantes de enfermería, terminaron en 15 minutos, al realizar el ejercicio solo tardaron 20 minutos, y al revisar su viabilidad, los pocos errores eran mejorables. Destaca su facilidad de uso en comparación con la instrucción de un modelado manual.

5.2 ÓRTESIS DE COLUMNA VERTEBRAL

El 36% de los artículos revisados reportaron el uso de órtesis de columna vertebral. Un dispositivo ortopédico para la espalda demuestra eficacia en pacientes con escoliosis idiopática, por ejemplo, y su efectividad esta notablemente vinculada al tiempo medio de uso. Actualmente, se emplean diversos métodos en la producción de estos dispositivos para la espalda. La fabricación aditiva tiene el potencial de proporcionar mejoras adicionales tanto en funcionalidad como en la estética de estos dispositivos médicos, lo que contribuye a una mayor aceptación por parte de los pacientes y a mejoras en los efectos terapéuticos (Ronca et al., 2022). Cinco artículos informaron sobre órtesis de columna vertebral en distintos contextos.

En el trabajo Ronca et al., (2022) se enfocaron en entender cómo las características del material, PLA y PET-G, influye en la calidad y rendimiento de un dispositivo fabricado mediante impresión 3D utilizando el software CAD Rhinoceros. En la investigación se obtuvieron especímenes a partir de hemicilindros impresos en 3D con dos orientaciones angulares distintas. Los resultados indican que las muestras fabricadas con PET-G exhiben las mejores propiedades mecánicas, en este tipo de órtesis, destacando en cuanto al módulo elástico y la capacidad de elongación antes de la ruptura. Por otro lado, las muestras de PLA mostraron un comportamiento

frágil característico, con una elongación antes de la rotura significativamente menor. Las pruebas de impacto revelaron que las muestras de PET-G presentaban una mejor absorción de energía. Además, las muestras de PET-G impresas en 3D exhibieron un acabado superficial superior con una interfaz de fibras más uniforme. Pudieron evidenciar que la selección adecuada de material y condiciones de impresión son cruciales para cumplir con los estándares de calidad y funcionalidad necesarios en un dispositivo ortopédico.

Además, hay artículos que evalúan de forma más realista, como ser el de Storm et al., (2022), consideran usuarios de una patología específica, como ser la escoliosis idiopática, los cuales les pidió utilizar una órtesis producida por fabricación aditiva durante 2 semanas. Se evaluó el proceso de producción de órtesis espinales producidas por fabricación aditiva utilizando el software Cura Ultimaker. La estabilidad postural en el dispositivo impreso en 3D y el convencional, medido utilizando métricas validadas obtenidas de un sensor inercial portátil. No se registraron diferencias estadísticamente significativas en ninguna de las mediciones de equilibrio postural entre el corsé impreso en 3D y el convencional, pero se observó una mejora significativa en las métricas de equilibrio postural. También menciona que, aunque la fabricación aditiva es una alternativa válida, a la vez demostró ser la fase más crítica de todo el proceso, ya que se requieren ajustes precisos para un resultado óptimo.

Figura 10. Órtesis de columna vertebral propuestas por (Storm et al., 2022).



A) Órtesis en la placa de construcción antes del posprocesamiento, B) Órtesis impresa en 3D (derecha) en comparación con órtesis termoformada (izquierda), C) Órtesis impresa en 3D que lleva el paciente.

Raux et al., (2014) realizaron un estudio comparativo de los métodos para la fabricación de órtesis, comparó el tradicional basada en el molde con yeso y el diseño asistido por ordenador con reconstrucción en 3D utilizando el software Ortenfile. El usuario elegido para el estudio probó las dos órtesis, y llegaron a la conclusión que la órtesis impresa en 3D permitiría podría detectar nuevas modificaciones en la deformidad del tronco y a la vez podría servir como herramienta de detección de la progresión de la patología, escoliosis en este caso.

Figura 11. Escoliosis idiopática: corrección en el aparato ortopédico con TLSO fabricado con sistema ORTENR propuesto por (Raux et al., 2014).



También hay artículos que describen el flujo de trabajo básico para la fabricación de estas órtesis impresas en 3D, como lo describen Weiss et al., (2017), se podría tomar como una guía general, ya que son pocos los ajustes descritos. Sin embargo, discute que las órtesis fabricadas aditivamente brindan mejores resultados a los usuarios que el método tradicional asimismo sugiere añadir complementos de softwares de fácil uso como ScolCAD, haciendo más accesible la impresión 3D en los flujos de trabajo de ajuste virtual de aparatos ortopédicos CAD/CAM.

Existen estudios que se enfocan en pasos más específicos, Grazioso et al., (2019) proponen un método fotogramétrico para mejorar la adquisición de datos y el procesamiento de las superficies corporales para la fabricación de órtesis hechas a la medida. Utilizan el software R4D un escáner corporal rápido (250 segundos), luego se evalúa por el uso de medidas cuantitativas

y cualitativas. Menciona que las ventajas de este método es la reducción de tiempo, calidad del producto y experiencia del paciente asimismo muestra gran ventaja para el profesional, ya que con el método tradicional resulta ser más tedioso, porque son mediciones son manuales. Esto da a entender que es una gran opción y con las herramientas necesarias se puede a obtener el resultado óptimo.

5.3 AFO

El 21% de los artículos revisados reportaron el uso de AFO. Las AFO son dispositivos médicos externos diseñados para restablecer el patrón natural de la marcha en paciente con trastornos neurológicos y musculoesqueléticos. Usualmente, el proceso de fabricación de estas órtesis es predominantemente manual y requiere tiempo, con los profesionales desempeñando un papel crucial en dicho procedimiento (Ielapi, Lammens, et al., 2019). Tres artículos informaron sobre AFO en distintos contextos.

Ielapi, Lammens, et al., (2019) introducen un enfoque novedoso al presentar un marco dedicado que combina métodos experimentales y numéricos utilizando el software PyFormex. Su objetivo es evaluar la rigidez del tobillo y la distribución de la tensión de las AFO durante la fase de segundo modelo de material avanzado específicamente para la poliamida 12(PA 12), el cual no había sido empleado previamente en estos dispositivos. Además, se considera el uso del análisis de elementos finitos para cuantificar la rigidez y la distribución de la tensión en su rango de movimiento específico, mostrando que la distribución de estas tecnologías tiene gran potencial para mejorar aún más el proceso de fabricación de AFO.

En el trabajo R. Xu et al., (2019) se realizó una investigación de los efectos de los AFO personalizados impresos en 3D sobre la biomecánica y la comodidad del pie plantar en la fascitis plantar utilizando el software FootScan 3D. Toman un grupo de 60 pacientes con esta patología de entre 31-60 años, se decidieron en dos grupos, un grupo utilizó AFO prefabricado y el otro utilizó AFO personalizado, el material de este fue Etileno Acetato de Vinilo (EVA). Los resultados indican que el AFO impreso es más adecuado para condiciones reales del pie, ya que el paciente

se alivió significativamente de la parte del talón, zona que más afecta esta patología, además de que tuvo un efecto de corrección en poco tiempo y mejora con el paso del tiempo.

Figura 12. AFOs propuestas por (R. Xu et al., 2019).

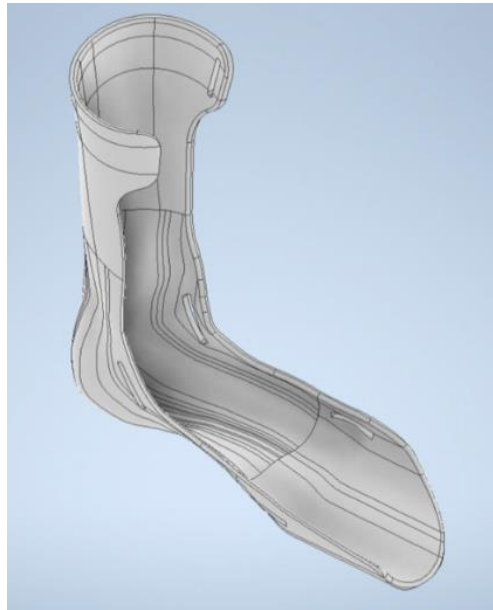


A) Órtesis personalizada B) Órtesis prefabricada

Raj et al., (2022) se centraron en analizar la resistencia de las AFO impresas en 3D, fabricadas por modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en ingles) y el material fue PLA y PLA-C (reforzado con fibra de carbono) utilizando Autodesk Inventor como software, además fue posible potenciar la fuerza flexor-plantar del tobillo mediante la mejora de los AFO termoplásticos con fibra de carbono. Se llevaron a cabo pruebas de resistencia mecánica personalizadas en una máquina universal de ensayos para obtener curvas de fuerza-desplazamiento, analizando la energía elástica almacenada llevando a cabo estudios de fractura. El comportamiento mecánico de ambos tipos de AFO se anticipó mediante un análisis de elementos finitos. Las predicciones del modelo se confirmaron al compararlas con las pruebas de resistencia mecánica realizadas en condiciones de carga y contorno idénticas a las del análisis de elementos finitos. Tanto en la predicción como en el análisis experimental, se observó que los AFO fabricados con PLA-C eran

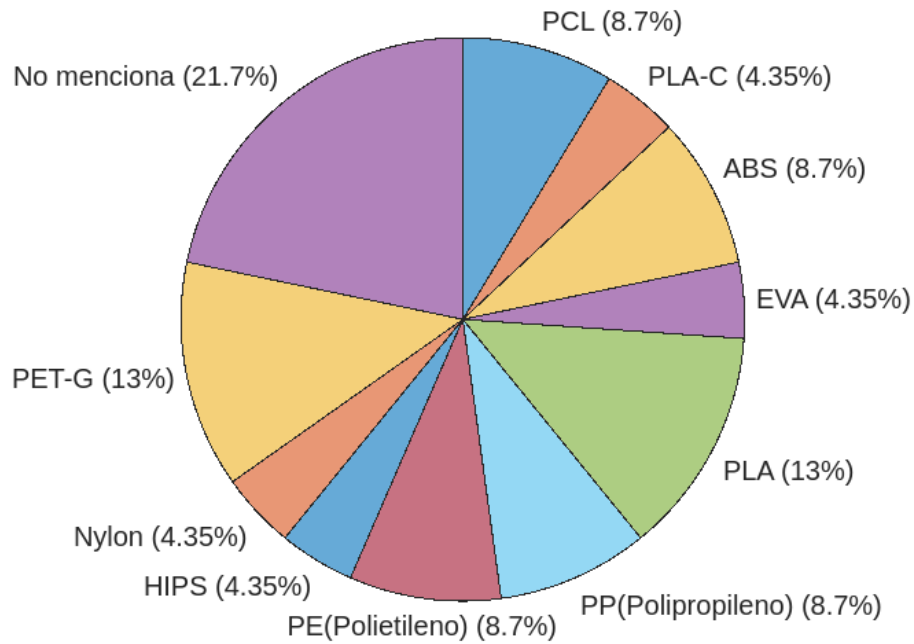
más rígidos y capaces de soportar las cargas superiores en comparación con los AFO basados en PLA. La simulación señaló un área de alta tensión coincidente con el punto de fractura observado experimentalmente. Además, estos modelos de alta precisión tienen el potencial de mejorar la fabricación de AFO sin requerir inversiones significativas de tiempo y recursos en ensayos.

Figura 13. AFO generado después de escaneo, diseño y modificación propuesto por (Raj et al., 2022).



Al realizar una revisión de cada artículo, hubo varios que tenían aspectos considerables, pero algunos destacan, como ser material de impresión, método de impresión, software y los que incluían el método de elementos finitos. Se muestran los resultados generales en las figuras 14-17.

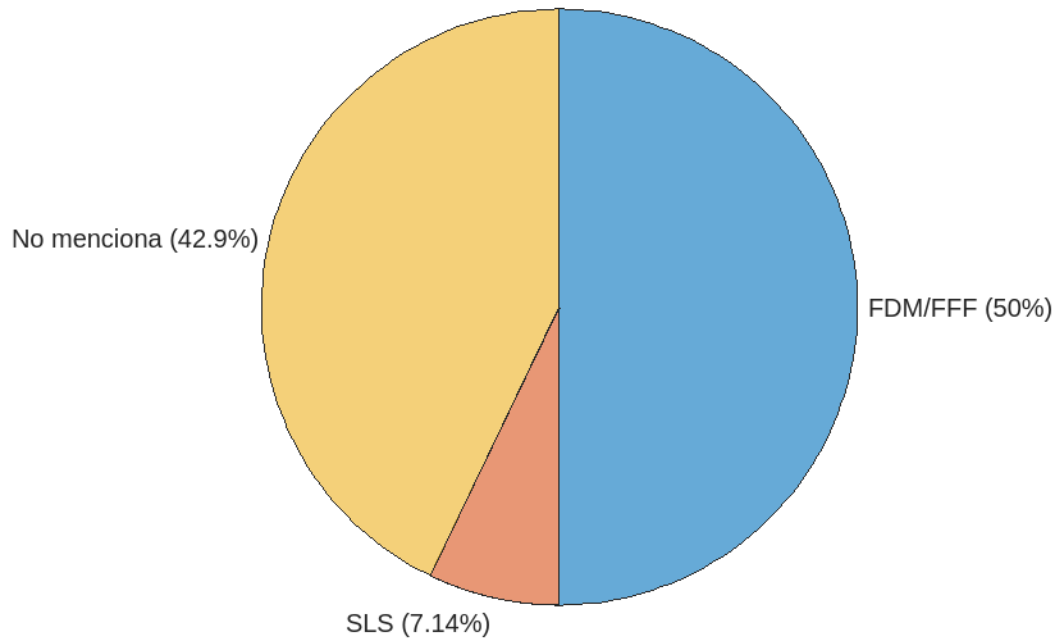
Figura 14. Distribución de los materiales utilizados en los artículos.



Fuente: Elaboración propia.

En el 21.7% de los artículos no se menciona el material de impresión utilizado, de los que si se hace mención, el más utilizado es PLA (Poli ácido láctico), aparte de ser biodegradable, presenta la capacidad de alterar sus propiedades al sumergirse en agua caliente (*Impresión 3D para hacer ortesis*, 2020) y PET-G (Poli tereftalato de etilenglicol) que al ser impreso 3D, muestra una mejor calidad superficial con una interfaz fibra-fibra más uniforme (Ronca et al., 2022) y los que menos se utilizan son Nylon el cual es un material popular debido a su combinación de resistencia, flexibilidad y durabilidad (D.E.M.A, 2022), HIPS (Poliestireno de Alto Compacto) que no dio buenos resultados un estudio (Górski et al., 2020) y EVA (Etileno Acetato de Vinilo) el cual si brindo efectividad en los resultados de su estudio (R. Xu et al., 2019).

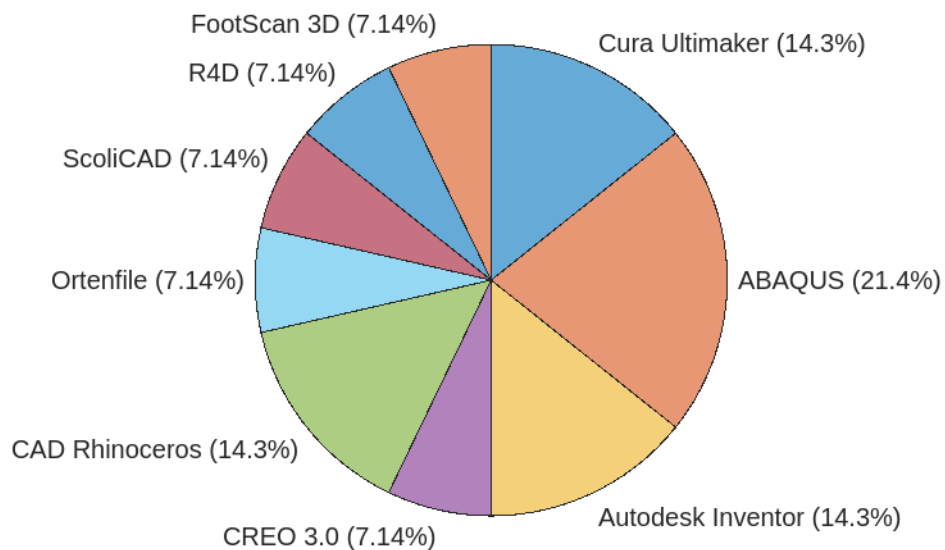
Figura 15. Distribución de los métodos de impresión utilizado en los artículos.



Fuente: Elaboración propia.

En el 43.9 % de los artículos no se menciona el método de impresión utilizado, el más utilizado por el 50% de los artículos es el FDM es una técnica de prototipado ampliamente utilizada y económica (Hudak et al., 2022) y el menos utilizado es SLS que implica la creación de piezas a través de la sinterización de capas de polvo, puede variar de plásticos hasta metales (Olavarría Lepe, 2019).

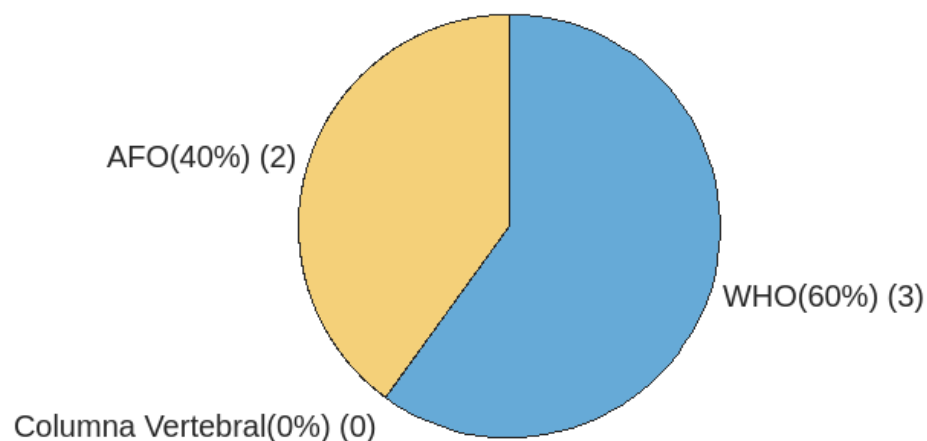
Figura 16. Distribución de los softwares utilizados en los artículos.



Fuente: Elaboración propia.

Todos los artículos utilizan diversidad de softwares para la fabricación de estas órtesis dependiendo específicamente de cuál sea, pero de todos, destaca solo ABAQUS, el más utilizado a pesar de ser solo para simulaciones de elementos finitos. Cabe mencionar que algunos softwares requieren de licencias o permisos, como ser ScolicAD, FootScan 3D, ABAQUS, o CAD Rhinoceros, no todos tienen libre acceso a todas sus herramientas, cada profesional busca lo que esté a su alcance para poder brindar el óptimo resultado en la fabricación de órtesis neuromuscular a cada usuario.

Figura 17. Distribución de porcentaje de los 5 artículos que consideran utilizar FEA.



Fuente: Elaboración propia.

El FEA se utiliza como un recurso complementario durante el proceso de fabricación de órtesis neuromusculares impresas en 3D, aunque algunos no lo consideran necesario, como en el caso de los artículos de órtesis de columna vertebral, pero de cinco artículos que utilizan FEA, tres artículos de WHO si lo consideraron junto a dos de AFO.

VI. DISCUSIÓN

6.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE IMPRESIÓN 3D

Existen varios materiales de impresión de impresión para las órtesis neuromusculares, cada uno tiene una ventaja significativa, pero dependen del contexto o ya sea la patología que se esté tratando. La mayoría de los artículos seleccionados no mencionan los materiales que utilizaron para la fabricación de las órtesis impresas en 3D, dándose a conocer que es uno de los inconvenientes mayormente presentados.

Uno de los materiales más utilizados fue PLA con un 13%, aparte de ser biodegradable, presenta la capacidad de alterar sus propiedades al sumergirse en agua caliente (*Impresión 3D para hacer ortesis*, 2020), pero puede tener sus inconvenientes como en la investigación de Górski

et al., (2020) donde realizaban una comparación de cuatro materiales para la fabricación de una órtesis de muñeca-mano, se menciona que los problemas con más repeticiones que podían impedir un óptimo resultado del producto ocurrieron solo con PLA, sin embargo, se recomienda en caso de que no se prevea que la órtesis experimente cargas dinámicas o temperaturas elevadas, se sugiere utilizar ABS ya que este es más resistente. Caso similar en las órtesis de columna vertebral, Ronca et al., (2022) mencionan que por motivos de seguridad, el PLA es menos apropiados que el PET-G para la producción de dispositivos ortopédicos destinados a la espalda. En situaciones de impacto accidental, la abrazadera hecha de PLA podría fracturarse de manera que exponga partes afiladas, mientras que la abrazadera fabricada con PET-G proporciona una mayor capacidad de elongación antes de romperse y una mayor capacidad absorción de energía, la morfología también influye tanto en la calidad como en el rendimiento de las piezas impresas, PET-G no solo exhibe propiedades mecánicas superiores, sino que también presenta un acabado superior en comparación con el PLA. Asimismo, Storm et al., (2022) evidencian que el PET-G es adecuado para órtesis de columna vertebral, además de que materiales como el PLA, si pueden utilizarse para la fabricación de órtesis pero deben investigarse más a fondo. También hubo un estudio de fabricación de AFO donde se considera utilizar el material PLA-C (reforzado con fibra de carbono) comparándolo con PLA como material inicial, Raj et al., (2022) demuestran que el PLA-C tiene una alta rigidez y podían soportar mayores cargas en comparación con el PLA.

El siguiente material que más se utilizó fue el PET-G, destaca mucho por su resistencia a comparación a otros materiales, como se mencionó anteriormente en distintos artículos. Este material es el único evaluado para una órtesis de WHO en el artículo de Łukaszewski et al., (2023) donde mencionan los beneficios como ser, el termoplástico más comúnmente reciclado, no es biodegradable sino absorbe humedad, lo cual es muy importante en caso de contacto con el sudor, a diferencia del PLA.

El material PCL es poco explorado en aplicaciones ortopédicas, Popescu, Stochioiu, et al., (2023) enfocaron su investigación en la idoneidad para producir WHO con este material, el cual se trata de un poliéster amigable con el medio ambiente, con una estructura semicristalina a

temperaturas corporales o ambiente, que capta el interés de los investigadores gracias a su biocompatibilidad, capacidad de biodegradación y una menor propensión a generar respuestas inmunológicas. Adicionalmente, el PCL es hidrofóbico, lo cual respalda su uso cotidiano en órtesis que pueden entrar en contacto con el agua, por ejemplo, por razones de higiene. Pudieron cumplir con la mayoría de sus objetivos, la única excepción fue el termoformado de estas muestras, resultaron infructuosas debido a las temperaturas de calentamiento.

También está el material ABS, que destaca por su resistencia al impacto y temperaturas, como por poseer una temperatura de transición vítrea más elevada en comparación con el material PLA, que asimismo es ampliamente utilizado (Łukaszewski et al., 2020). Según Górski et al., (2020), quienes realizaron una comparación entre cuatro materiales en órtesis de muñeca, mencionan que tuvieron problemas menores, pero ninguno fue por parte del material ABS, en cambio lo recomiendan para su fabricación de forma horizontal, en este caso. Además, menciona que no es adecuado para contacto directo con la piel sin esterilización previa y durante su uso, tampoco es considerado respetuoso con el ambiente y tiene un costo similar al del PLA.

El material PP(Polipropileno) y el PE(Polietileno) son otros materiales poco considerados, Storm et al., (2022) confirma en su estudio que las muestras de PET-G exhibieron propiedades mecánicas comparables a las muestras de PP en lo que respecta al módulo elástico y la resistencia máxima a la tracción. Por otro lado, las muestras de PE mostraron un mejor rendimiento en cuanto a la elongación antes de la rotura, aunque resultaron ser menos rígidas que las muestras de PET-G.

Hubo algunos materiales que son poco utilizados para las órtesis neuromusculares impresas en 3D. Uno de ellos es EVA el cual es raramente utilizado para estudios de fabricación de órtesis impresas en 3D, en el estudio de R. Xu et al., (2019) no mencionan propiedades del material, ni características favorables de este. Otro de los materiales es HIPS, Górski et al., (2020) menciona que en su estudio se descartó completamente por los resultados desfavorables de las pruebas, la mala capacidad de impresión y propiedades generales. Además, otro material que se evalúa en este estudio es el Nylon, asimismo es uno de los menos utilizados, siendo un material

significativamente más costos y más complicado de fabricar en comparación el con PLA y ABS, tiene una alta resistencia al impacto y arañazos, además de ser respetuoso con el ambiente, tener ciertos valores estéticos y ser respetuoso con la piel.

6.2 CONSIDERACIONES DE LOS MÉTODOS DE IMPRESIÓN 3D

En casi la mitad de los artículos no se menciona el método de impresión utilizado para las órtesis impresas en 3D, así como con los materiales. Hay menos variedad de opciones, según los artículos seleccionados pero el que es más utilizado es FDM/FFF, los productos fabricados por este método se producen mediante superposición de capas de un material termoplástico plastificado, generalmente en forma de alambre, conocido como filamento(Łukaszewski et al., 2020). La variedad de materiales disponibles que pueden por procesarse con FDM está en crecimiento, pero lo más extendidos son el ABS y PLA. Una de las mayores desventajas del FDM son las propiedades mecánicas relativamente bajas de las piezas obtenidas como ser la resistencia a la tracción y a la flexión, resistencia al impacto, alargamiento a la rotura y otros(Górski et al., 2020) asimismo se menciona en el estudio de (Storm et al., 2022). Ofrece un equilibrio adecuado entre la calidad de impresión final, la velocidad de impresión y el costo del material(Ronca et al., 2022).

El siguiente método es el SLS, Weiss et al., (2017) presenta un flujo de trabajo para la fabricación de órtesis de columna vertebral, en este caso, donde solamente muestra la órtesis impresa y el método utilizado es SLS, el cual es un proceso que se caracteriza por ser lento, sin embargo, proporciona una variedad extensa de materiales para impresión.

6.3 SOFTWARES

Hubo gran variedad de softwares utilizados en los distintos artículos seleccionados, el más utilizado fue el software ABAQUS, conocido por ser utilizado para análisis y simulación por elementos finitos ya que brinda una predicción precisa lo que reduce las pruebas físicas pero es costosa, por esto mismo posiblemente requiere de licencias(DassaultSystems, 2020) le siguen el software Cura Ultimaker el cual es el más popular para impresión 3D, por su facilidad de uso, su compatibilidad con formatos de archivos, software de código abierto y disponibilidad de varios

idiomas(M, 2023b), el software Autodesk Inventor el cual contiene un set completo de herramientas para optimizar tiempo, calidad y costes en la fabricación de las piezas además facilita el software colaborativo sin importar el software CAD que se utilice y facilita el diseño personalizado (NKE, 2021) y el software CAD Rhinoceros permite crear varias formas complejas con buena precisión además de que es compatible con varios programas de diseño pero tiene su costo y que permite exportar a formatos de impresión 3D, no es su especialidad(M, 2023). De los demás softwares utilizados esta FootScan 3D, una herramienta que brinda precisión y detalle, personalización a las necesidades del usuario según su patología pero es costosa, además de quien lo use debe recibir capacitación y estar familiarizado con el software (Barbaza, 2023). El software R4D de Rodin4D es una herramienta para técnicos ortopédicos ofreciendo una solución integral en constante desarrollo siendo costosa y quienes la utilicen deben estar familiarizados con sus funciones (Rodin4D, 2022.). El software ScolicAD es bueno para el modelado dimensional preciso aunque este requiere mucho tiempo para hacerlo(MS Ingeniería, 2020). El software Ortenfile el cual es de código abierto, teniendo ventajas como su rentabilidad, flexibilidad y personalización para el usuario de modificar el código pero como desventaja tiene la falta de atención al cliente(Barbaza, 2024). El software CREO 3.0 el cual es un software con integración completa, puede combinarse con el diseño generativo y simulación en tiempo real, además su última versión incluye mejoras de usabilidad y productividad en diseños basados en modelos, pero tiene un costo significativo y cierto tiempo para que los usuarios se familiaricen(M, 2022).

6.4 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS (FEA)

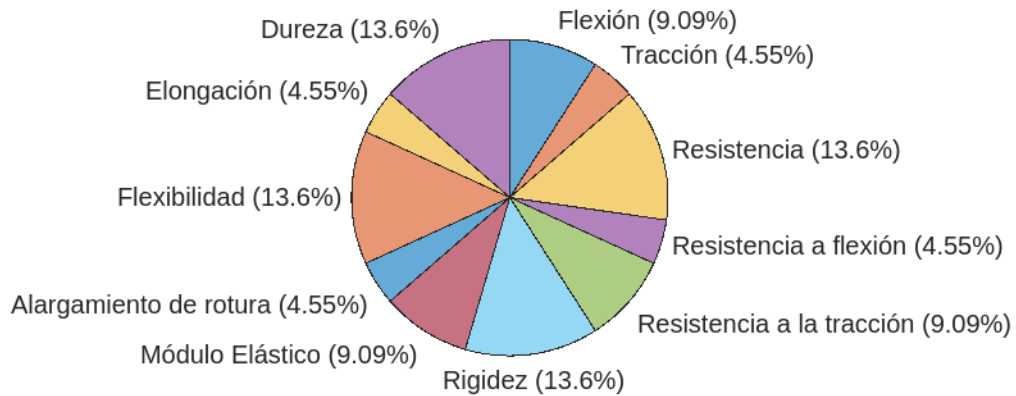
Entre los artículos seleccionados, solamente cinco de ellos consideraron el uso de FEA para sus estudios, solamente en los artículos de columna vertebral fue donde no se tomó en cuenta este método, pero en los artículos de AFO y WHO si lo consideraron, se menciona que la combinación efectiva de algoritmos de modelado computacional y técnicas de impresión 3D constituye una poderosa sinergia que contribuye a perfeccionar el proceso de fabricación de las órtesis neuromusculares. Este avance representa un significativo paso adelante para anticipar el comportamiento futuro de las AFO en situaciones patológicas (Ielapi, Lammens, et al., 2019). En estudios como el de Popescu, Stochioiu, et al., (2023) realizaron varios modelos de una WHO de

diferentes tamaños de espesor para poder realizar una comparación entre los dos materiales seleccionados y seleccionar el más conveniente. Así como los resultados eficientes del artículo Raj et al., (2022) los cuales sus valores experimentales eran muy similares a los de FEA. Cabe mencionar que la adaptación precisa de la forma del producto según las características de cada paciente tiene el potencial de disminuir el tiempo de producción al eliminar la necesidad de utilizar material en exceso. En esencia, la integración del FEA podría agilizar la entrega de dispositivos ortopédicos personalizados a los pacientes (Łukaszewski et al., 2023). En general, los artículos presentan los resultados esperados, y afirman que es una gran herramienta para la fabricación efectiva de las órtesis impresas en 3D.

6.5 DISEÑO GEOMÉTRICO

Se explora la influencia de diseño geométrico de las órtesis en sus propiedades mecánicas, considerando factores como la forma. En cuanto a las propiedades mecánicas, hay que tener en cuenta que pueden variar bastante, dependiendo del material y del método que usé. Según los artículos seleccionados solo hubo dos métodos de impresión 3D utilizados, siendo estos FDM/FFF y SLS, siendo esta la base. En el artículo de Weiss et al., (2017) donde se utiliza SLS como método de fabricación, no describe las propiedades mecánicas que conllevó la fabricación de la órtesis de columna vertebral, en este caso, como el artículo trata del flujo de trabajo para la fabricación de las mismas, solo muestra la imagen del resultado, no explica ajustes específicos o adversidades que se puedan presentar. En cambio, hay varios estudios donde se utiliza el método FDM/FFF junto a varios materiales, en la mayoría si se describen las propiedades utilizadas, es mínimo el número de artículos donde no se describen; las propiedades mecánicas son muy variados, ya que también hay que tomar en cuenta la patología y el tipo de órtesis que se quiere analizar.

Figura 18. Distribución de las propiedades mecánicas en los artículos en general.



Fuente: Elaboración propia.

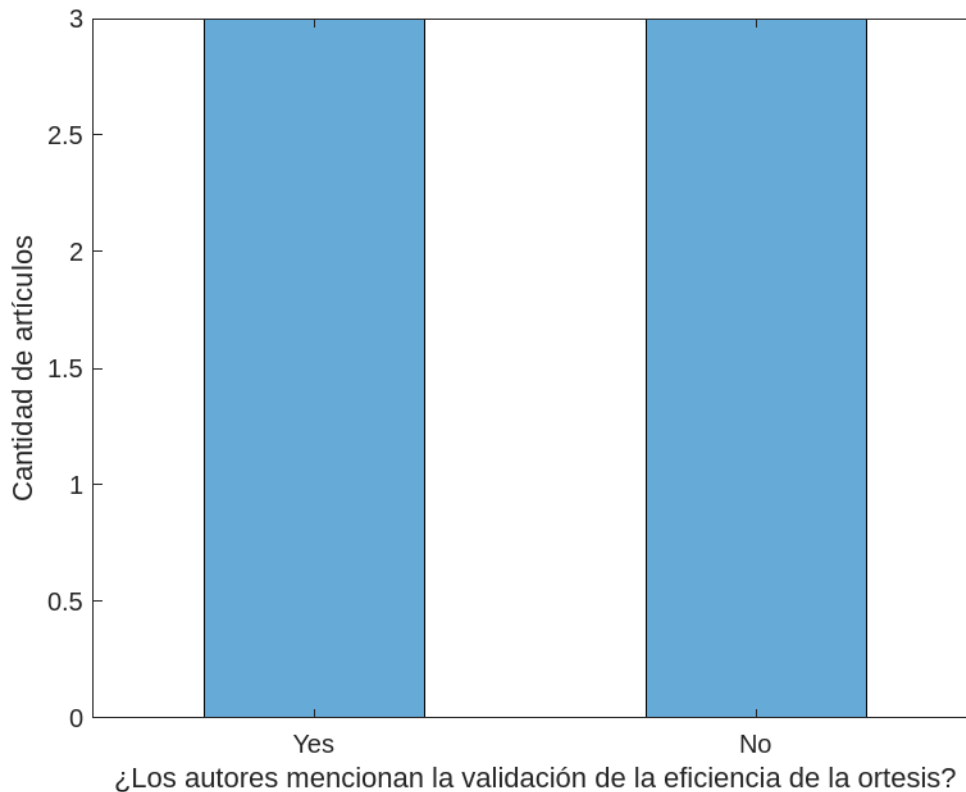
Las propiedades mecánicas son esenciales para el diseño y funcionalidad de las órtesis, influyen en como el cuerpo proporciona soporte y corrección a la zona específica. De las más destacadas en los artículos seleccionados fueron (1) la flexibilidad que permite movimientos naturales mientras se brinda el soporte necesario, (2) dureza y (3) rigidez las cuáles afectan la capacidad de las órtesis de brindar el soporte necesario, aunque se pueden ajustar a las necesidades del usuario, (4) la resistencia a la tracción la cual hace que la órtesis resista fuerzas de estiramiento. Las siguientes fueron poco consideradas como ser (5) la flexión la cual permite el movimiento natural de las articulaciones, a la vez brindando el soporte necesario, (6) la resistencia que garantiza que la órtesis pueda soportar golpes y fuerzas repentinas in romperse, , (7) el módulo elástico que hace que la órtesis se adapte a los movimiento y dar soporte, y los menos utilizados fueron cuatro propiedades, (8) la tracción permite que el material resista tensiones sin comprometer la movilidad, (9) la resistencia a la flexión soporta fuerzas y movimientos, haciendo que no hayan daños, (10) el alargamiento de rotura permite que pueda haber más estiramiento antes de romperse y (11) elongación que le da capacidad al material de estirarse o alargarse antes de romperse (Thusen, 2021).

En cuanto a la forma de las órtesis neuromusculares propuestas en los artículos, tanto las WHO, AFO y las órtesis de columna vertebral tienen una forma muy parecida entre ellas, indicando que cumple con especificaciones técnicas asimismo buenos resultados en la vida del usuario.

6.6 VALIDACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS ÓRTESIS

La validación de la eficiencia de las órtesis tiene gran influencia en la impresión de las órtesis neuromusculares, ya que se puede verificar la adaptabilidad de la pieza a la necesidad que el usuario presente. En los estudios seleccionados, seis incluían a participantes específicos, pero solamente tres mencionan el impacto que tuvo para el usuario. Destaca el estudio de R. Xu et al., (2019) el cual menciona el aumento de comodidad al usar la órtesis AFO, descrito por los participantes, dentro del tiempo estipulado. En cambio, estudios como el de Raj et al., (2022) y Storm et al., (2022) mencionan que obtuvieron resultados óptimos en las pruebas realizadas, pero no describen mínimamente si la pieza tuvo buen impacto en el usuario durante el tiempo del estudio. Los demás artículos donde se evaluó una órtesis neuromuscular con participantes no mencionan la adaptabilidad que le brindó al usuario, solo concluye mencionando si los resultados fueron los esperados junto a ciertas variaciones que pudieron ocurrir durante el estudio.

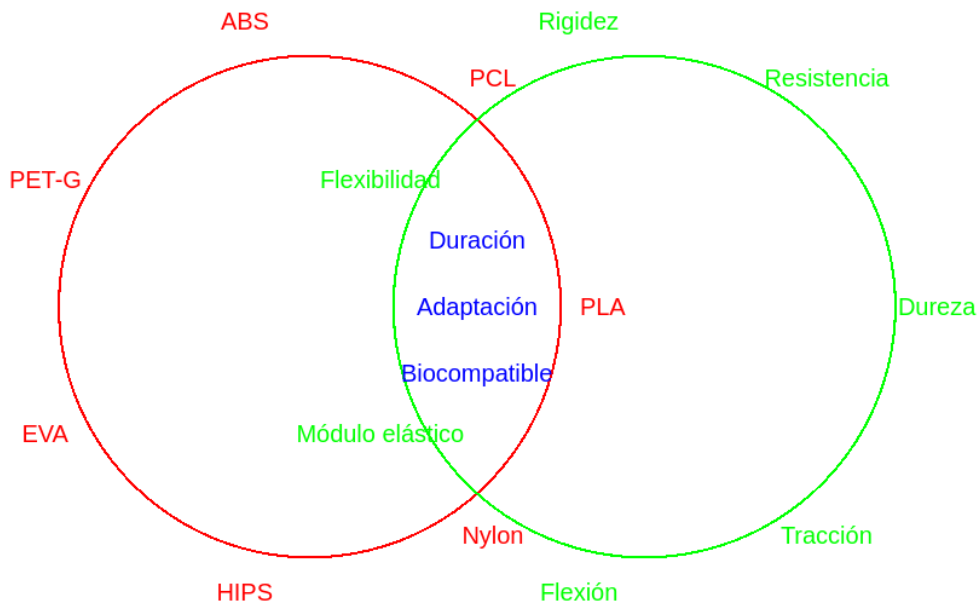
Figura 19. Histograma de la validación de la eficacia de las órtesis en los artículos.



Fuente: Elaboración propia.

6.7 RELACIÓN ENTRE LOS MATERIALES DE IMPRESIÓN Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Figura 20. Relación entre los materiales de impresión y las propiedades mecánicas.

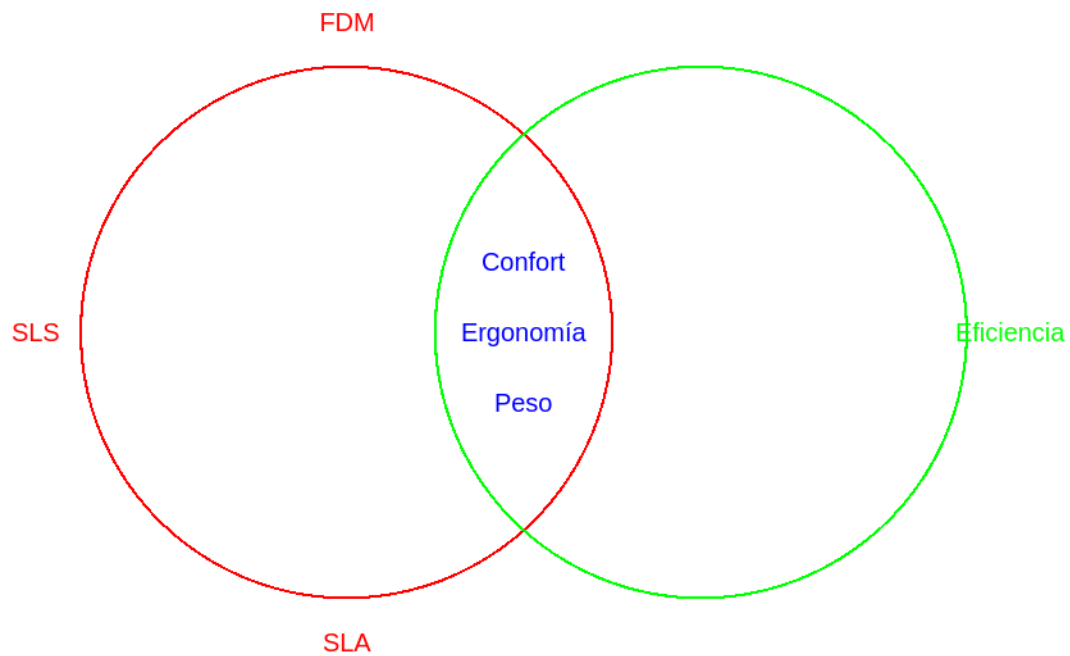


Fuente: Elaboración propia.

Los materiales es un aspecto crucial ya que determina directamente las propiedades mecánicas y el rendimiento de las órtesis impresas en 3D. Por ejemplo, el material PLA es caracterizado por ser rígido y quebradizo, en cambio, el material PET-G se caracteriza por su resistencia a la tracción y al impacto. La elección del material es esencial para darle al usuario una pieza más duradera y resistencia, también como adaptabilidad a su forma y movimiento que incluye la consideración del peso de la órtesis junto a la biocompatibilidad la cual le brinda seguridad y comodidad, haciendo que las piezas no causen irritación o reacciones alérgicas en la piel del usuario.

6.8 RELACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE IMPRESIÓN Y LA EFICIENCIA DE LA ÓRTESIS.

Figura 21. Relación entre Métodos de impresión y la eficiencia de la órtesis.

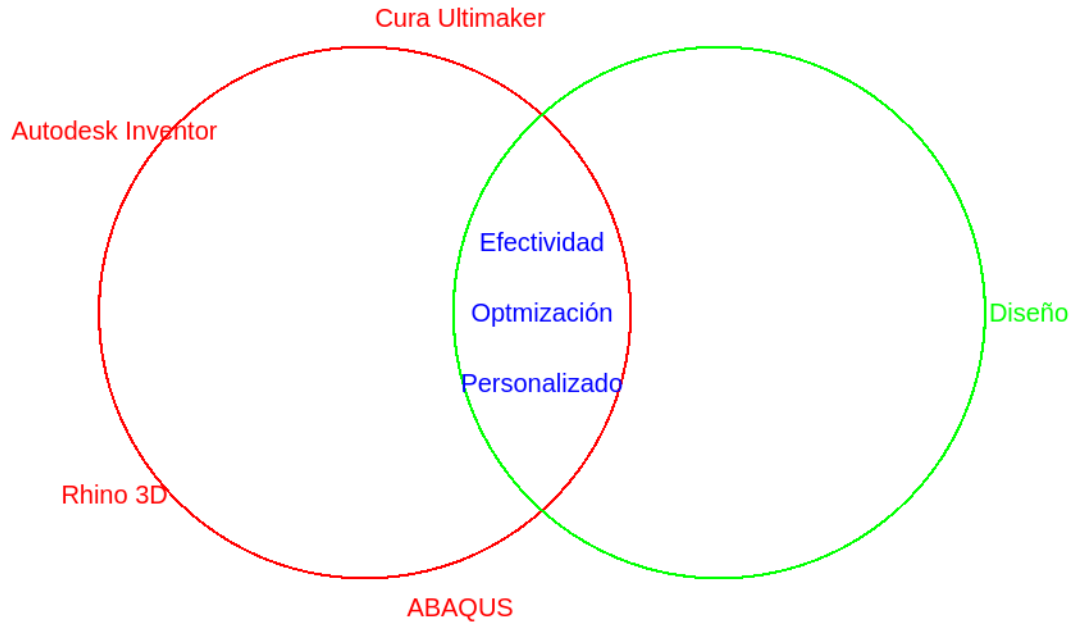


Fuente: Elaboración propia.

El método de impresión utilizado en el proceso de fabricación de órtesis puede tener gran influencia en su eficiencia y efectividad. Los métodos de impresión varían en su producción, es decir que tienen diferentes capacidades para producir las órtesis personalizadas y ajustadas a las necesidades de los usuarios, como SLA que produce pieza a un detalle excepcional, dando una adaptación precisa, lo que mejora la eficacia dándole un ajuste cómodo. Un diseño ergonómico mejora la eficacia haciendo que el usuario se mueva de una manera más natural, dependiendo del método de impresión seleccionado, así podrá adaptarse a la forma del cuerpo, lo que hará que el usuario sienta comodidad. En cuanto al peso, al fabricar una ortesis liviana, el usuario podrá mejorar su movilidad para la realización de sus actividades cotidianas.

6.9 RELACIÓN ENTRE LOS SOFTWARES Y EL DISEÑO DE LAS ÓRTESIS

Figura 22. Relación entre los softwares y el diseño de órtesis.



Fuente: Elaboración propia.

Lo principal en la relación entre los softwares y el diseño de las órtesis es su personalización, esto depende del software que se seleccione, algunos permiten funciones que facilitan la adaptación del diseño a la anatomía del usuario. Al momento de optimizar el diseño, es cuando los profesionales adaptan la pieza a la necesidad presente en el usuario, tratando que encaje, asimismo al momento de fabricar la pieza se busca optimizar tiempo y costes. Un diseño efectivo se obtiene mediante datos biomédicos precisos principios biomecánicos y ergonómicos junto a la validación clínica, y su efectividad se mide a través de pruebas clínicas y retroalimentación de los usuarios, verificando la posible corrección médica como también la satisfacción del usuario.

6.10 LIMITACIONES

Una limitación presente fue que solo se consideraron dos bases de datos en la búsqueda de los artículos, siendo estas las más relevantes para el tema de investigación, probablemente se

encuentren más artículos de órtesis neuromusculares impresas en 3D, pero no cumplieron con los criterios de admisibilidad, por lo tanto, no se incluyeron en el estudio.

Se considera la limitada disponibilidad de tipo de órtesis en los artículos, ya que solo artículos de tres tipos de órtesis neuromusculares cumplían con los criterios de admisibilidad establecidos; existen órtesis de cabeza, cuello u hombro que también son considerados como órtesis neuromusculares, pero no apareció ningún artículo que se enfocara en alguno de estos.

Otra limitación fue en la generalización de los datos, como ser los softwares, son muy variados en los diferentes contextos, esta variabilidad podría no estar presentado a detalle afectando las conclusiones del estudio.

VII. CONCLUSIONES

1. Se completó una revisión de la literatura donde se seleccionaron 14 artículos de órtesis neuromusculares impresas en 3D para poder evaluar las herramientas que se utilizan para la fabricación de estas como ser material, método de impresión, softwares, eficiencia de la órtesis y en algunos análisis de elementos finitos. Los resultados demostraron lo que contenía cada artículo, no todos contenían los aspectos importantes que se deben de tomar en cuenta, la definición del material es una debilidad notable y del cual se hizo mención en los artículos, además de que los softwares necesitan de licencias, las cuales son costosas, además que el usuario debe estar familiarizado con la herramienta para poder obtener el resultado deseado. Se muestran asimismo la relación que hay entre los distintos aspectos considerados, describe que una herramienta une a la otra, es decir que desde el punto uno se debe estar seguro de herramienta a seleccionar para que la fabricación sea lo suficientemente eficaz para el usuario y así satisfacer las necesidades que presente.
2. La evaluación mecánica de las órtesis involucra aspectos relevantes en el rendimiento y propiedades de las órtesis neuromusculares fabricadas. Los aspectos considerados fueron el material de impresión, el método de impresión, diseño geométrico, si se utilizaba la evaluación computacional refiriéndose a la consideración del método de elementos finitos y el impacto biomecánico de los artículos los cuales incluían a usuarios específicos en su estudio refiriéndose a la adaptabilidad y rendimiento que tuvo la órtesis neuromuscular en ellos, adicionalmente se consideraron incluir los softwares que se utilizaron en el proceso de fabricación de las órtesis neuromusculares impresas en 3D. Se mostró que los materiales más utilizados son el PLA y Pet-G, donde el PLA es considerado en los tres tipos de órtesis en los distintos artículos aunque fue más utilizado en los artículos de órtesis de columna vertebral, este material es fácil de imprimir, se utiliza por su resistencia a la rotura además de que es de bajo costo por esto mismo se utiliza más en ortesis que no estén establecidas a usar por una largo plazo de tiempo; el material PET-G fue considerado en los artículos de WHO y de órtesis de columna vertebral, este destaca mucho por su resistencia al impacto y estabilidad además de que tiene más propiedades a comparación

del PLA como ser que puede entrar en contacto con el sudor, no se degrada en agua y es hidrofóbico, siendo más utilizado para ortesis de columna vertebral; el método de impresión usado por el 50% de los artículos fue FDM/FFF el cual es una superposición de materiales de un filamento, la precisión puede variar según la configuración de la impresora pero se mencionó el SLS, proceso que funde polvo termoplástico, este método es mínimamente considerado ya que es un proceso lento, costoso pero preciso y detallado, el diseño geométrico se explora en sus propiedades mecánicas, las más destacadas fueron dureza, resistencia, rigidez y flexibilidad. Solamente los artículos de WHO y AFO consideraron la utilización del análisis de elementos finitos, los artículos de columna vertebral no lo tomaron en cuenta. Refiriéndose a la validación de eficiencia de las órtesis, en seis artículos se eligieron a grupos específicos de personas y en tres se menciona directamente si le fue eficiente al usuario. Hubo varios softwares utilizados en los artículos, pero el software ABAQUS fue el más utilizados.

3. Entre los desafíos que se encontraron, la definición de los materiales fue el más notable, ya que en la mayoría de los artículos no se menciona el material que se utilizó y en algunos de ellos no se habla del porqué se eligió, ya que este es un punto importante para la fabricación de órtesis neuromusculares impresas en 3D asimismo a la comodidad del usuario. También se podría considerar el tema de los softwares, ya que no todos son de libre acceso, eso implica que tenga todas las herramientas necesarias disponibles para una fabricación eficiente de las órtesis impresas en 3D, algunos necesitan licencias costosas, pero con ventaja de ser un software completo para la fabricación de estas. En cuanto al impacto biomecánico, muy pocos artículos hicieron mención específica de que la órtesis neuromuscular evaluada tuvo resultados eficientes en el grupo de usuarios seleccionados, siendo esta gran referencia para poder definir y convencer de que el estudio tuvo éxito.
4. El diseño de las órtesis neuromusculares mostradas en los artículos es bastante similar, en cuanto a las órtesis de columna vertebral, se presentan corsés ortopédicos, ya que estos brindan estabilidad a la columna vertebral, corrección de postura, reducción en la carga de la espalda, en general brinda gran apoyo neuromuscular. Las WHO en su mayoría se

asemejan a un guante sin cubrir los dedos, ya que le brinda soporte a la muñeca, estabilización de las articulaciones y movilización de los dedos lo que permite que el usuario realiza sus tareas diarias. En los artículos de AFO hubo dos diseños, el más conocido con forma de bota, pero sin recubrimiento de la parte superior del pie, el cual da estabilidad y soporte al tobillo, reducción de riesgo de lesiones, control al subir o bajar el pie además de una correcta alineación, el otro diseño es una plantilla personalizada para una patología específica, para la cual adaptaron piezas impresas en 3D para que pudiera cumplir con las necesidades del usuario. Toda órtesis debe estar diseñada para que cumpla con una correcta ergonomía y comodidad del paciente, en general, la elección del material es crucial, ya que es un aparato que el usuario estará usando a largo plazo, además, debe ser cómoda, debe adaptarse a la forma del área específica, de fácil uso, que le brinde durabilidad y resistencia por su uso prolongado y que no limite el exceso de movilidad ósea debe darle al usuario libertad de realizar levemente sus actividades cotidianas. En cuanto a las WHO, es recomendable que la órtesis le permite un rango de movimientos para las actividades cotidianas del usuario para agarrar objeto, escribir o manipular herramientas, además, proporcionar ventilación adecuada por la acumulación del sudor, y que sea fácil de limpiar para mantener una buena higiene. En cuanto a las órtesis de columna vertebral, primordialmente debe brindar estabilidad y soporte para una correcta alineación de columna; las dimensiones y forma de la columna puede variar significativamente entre los usuarios entonces la órtesis debe ser ajustable para que se adapte a los diferentes tamaños y formas del cuerpo. En cuanto a las AFO, principalmente debe dar estabilidad al tobillo, el diseño de la órtesis debe permitir una flexión y extensión adecuada del tobillo.

5. Se sintetizaron los datos obtenidos de los artículos seleccionados, los gráficos muestran el porcentaje de la usabilidad que hubo en los artículos donde se incluía cada aspecto, asimismo se muestra si en alguno no se incluye. La recolección de datos permitirá brindar recomendaciones fundamentadas, que puedan contribuir a la optimización de la fabricación de las órtesis neuromusculares impresas en 3D.

VIII. RECOMENDACIONES

Se sugiere que en futuras revisiones de literatura se incluyan otro tipo de órtesis impresas en 3D, sin limitarse a las órtesis neuromusculares. Siendo los miembros superiores parte fundamental en las actividades diaria de los usuarios, no descarta la necesidad de una correcta investigación de las demás órtesis existentes como ser órtesis de pie, para así brindar eficiencia y buen impacto biomecánico en las actividades diarias de quienes la utilicen, asimismo incluir artículos donde se describa la validación clínica en entornos del mundo real, podría ser simplemente incluyendo comentarios sobre la comodidad que les brindó dicha órtesis a quienes la probaron durante el tiempo establecido en el estudio. Adicionalmente podría considerarse realizar un análisis costo-beneficio, para evaluar su viabilidad económica de poder adoptar dichas órtesis, tanto para pacientes como para proveedores.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. *10 ventajas y desventajas de la impresión 3D*. (2023, marzo 1). <https://barrazacarlos.com/es/ventajas-y-desventajas-de-la-impresion-3d/>
2. *12 Ventajas y desventajas del software de fuente abierta*. (2024, febrero 2). <https://barrazacarlos.com/es/ventajas-e-inconvenientes-del-software-de-codigo-abierto/>
3. Brognara, L., Fantini, M., Morellato, K., Graziani, G., Baldini, N., & Cauli, O. (2022). Foot Orthosis and Sensorized House Slipper by 3D Printing. *Materials (Basel, Switzerland)*, *15*(12), 4064. <https://doi.org/10.3390/ma15124064>
4. C, L. (2022, junio 5). *Guía completa: El filamento de ABS en la impresión 3D*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/>
5. Chalgham, A., Ehrmann, A., & Wickenkamp, I. (2021). Mechanical Properties of FDM Printed PLA Parts before and after Thermal Treatment. *Polymers*, *13*(8), 1239. <https://doi.org/10.3390/polym13081239>
6. D.E.M.A. (s. f.). *Tendencia: Impresión 3D y prótesis ortopédicas*. Recuperado 14 de enero de 2024, de <https://blog.dema-argentina.com.ar/tendencia-impresion-3d-y-protesis-ortopedicas>
7. Fu, J., Ni, M., Chen, J., Li, X., Chai, W., Hao, L., Zhang, G., & Zhou, Y. (2018). Reconstruction of Severe Acetabular Bone Defect with 3D Printed Ti6Al4V Augment: A Finite Element Study. *BioMed Research International*, *2018*, 6367203. <https://doi.org/10.1155/2018/6367203>
8. Garrido Sánchez, G. (2019). *Diseño y fabricación de un dedo protésico articulado mediante impresión 3D*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/38499>
9. Gholampour, S., Gholampour, H., & Khanmohammadi, H. (2019). Finite element analysis of occlusal splint therapy in patients with bruxism. *BMC Oral Health*, *19*(1), 205. <https://doi.org/10.1186/s12903-019-0897-z>
10. Gil, J., Sánchez-Villamañán, M. C., Gómez, J., Ortiz, A., Pons, J. L., Moreno, J. C., & Del-Ama, A. J. (2018). Design and Implementation of a Novel Semi-Active Hybrid Unilateral Stance Control Knee Ankle Foot Orthosis. *2018 IEEE/RSJ International Conference on*

Intelligent Robots and Systems (IROS), 5163-5168.
<https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594219>

11. González, A. C. (2022, marzo 20). Impresión 3D, todo lo que debes de conocer. *Profesional Review*. <https://www.profesionalreview.com/2022/03/20/impresion-3d/>
12. Górski, F., Wichniarek, R., Kuczko, W., Żukowska, M., Lulkiewicz, M., & Zawadzki, P. (2020). Experimental Studies on 3D Printing of Automatically Designed Customized Wrist-Hand Orthoses. *Materials (Basel, Switzerland)*, 13(18), 4091. <https://doi.org/10.3390/ma13184091>
13. Gozar, H., Derzsi, Z., Chira, A., Nagy, Ö., & Benedek, T. (2018). Finite-element-based 3D computer modeling for personalized treatment planning in clubfoot deformity: Case report with technique description. *Medicine*, 97(24), e11021. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000011021>
14. Grazioso, S., Selvaggio, M., Caporaso, T., & Di Gironimo, G. (2019). A Digital Photogrammetric Method to Enhance the Fabrication of Custom-Made Spinal Orthoses. *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 31(2), 133. <https://doi.org/10.1097/JPO.0000000000000244>
15. Heinze, A., Basulto-Martinez, M., & Suárez-Ibarrola, R. (2020). Impresión 3D y sus beneficios en el campo de la educación médica, entrenamiento y asesoría del paciente. *Revista Española de Educación Médica*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.6018/edumed.421221>
16. *Historia y evolución de las órtesis*. (s. f.). Genially. Recuperado 14 de enero de 2024, de <https://view.genial.ly/637c2bddc04d4d00122cadd0/interactive-content-historia-y-evolucion-de-las-ortesis>
17. Hu, F., & Wu, D. (2019). Cellular Structures Design for Wrist Rehabilitation Considering 3D Printability and Mechanics Lightweight. *2019 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA)*, 315-321. <https://doi.org/10.1109/WRC-SARA.2019.8931918>
18. Hu, P., Wu, T., Wang, H.-Z., Qi, X.-Z., Yao, J., Cheng, X.-D., Chen, W., & Zhang, Y.-Z. (2019). Biomechanical Comparison of Three Internal Fixation Techniques for Stabilizing Posterior Pelvic Ring Disruption: A 3D Finite Element Analysis. *Orthopaedic Surgery*, 11(2), 195-203. <https://doi.org/10.1111/os.12431>

19. Hudak, Y. F., Li, J.-S., Cullum, S., Strzelecki, B. M., Richburg, C., Kaufman, G. E., Abrahamson, D., Heckman, J. T., Ripley, B., Telfer, S., Ledoux, W. R., Muir, B. C., & Aubin, P. M. (2022). A novel workflow to fabricate a patient-specific 3D printed accommodative foot orthosis with personalized latticed metamaterial. *Medical Engineering & Physics*, *104*, 103802. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2022.103802>
20. Ielapi, A., Forward, M., & De Beule, M. (2019). Computational and experimental evaluation of the mechanical properties of ankle foot orthoses: A literature review. *Prosthetics and Orthotics International*, *43*(3), 339-348. <https://doi.org/10.1177/0309364618824452>
21. Ielapi, A., Lammens, N., Van Paepegem, W., Forward, M., Deckers, J. P., Vermandel, M., & De Beule, M. (2019). A validated computational framework to evaluate the stiffness of 3D printed ankle foot orthoses. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, *22*(8), 880-887. <https://doi.org/10.1080/10255842.2019.1601712>
22. *Impresión 3D para hacer ortesis: Ventajas y desventajas. | Reab.* (2020, marzo 6). <https://www.reab.es/impresion-3d-para-hacer-ortesis-ventajas-y-desventajas/>
23. Kermen, E., & Mohammadi, H. (2021). Mechanics of foot orthotics: Material properties. *Journal of Medical Engineering & Technology*, *45*(8), 627-641. <https://doi.org/10.1080/03091902.2021.1940332>
24. Li, J., & Tanaka, H. (2018). Feasibility study applying a parametric model as the design generator for 3D-printed orthosis for fracture immobilization. *3D Printing in Medicine*, *4*, 1. <https://doi.org/10.1186/s41205-017-0024-1>
25. Łukaszewski, K., Raj, R., & Karwasz, A. (2023). Mechanical Evaluation of PET-G 3D-Printed Wrist-Hand Orthosis: An Integrated Experimental and Numerical Approach. *Materials (Basel, Switzerland)*, *16*(18), 6132. <https://doi.org/10.3390/ma16186132>
26. Łukaszewski, K., Wichniarek, R., & Górski, F. (2020). Determination of the Elasticity Modulus of Additively Manufactured Wrist Hand Orthoses. *Materials (Basel, Switzerland)*, *13*(19), 4379. <https://doi.org/10.3390/ma13194379>
27. M, A. (2022, noviembre 27). *Todo lo que necesitas saber sobre la solución de software Creo. 3Dnatives.* <https://www.3dnatives.com/es/guia-software-cad-creo-28112022/>

28. M, A. (2023a, enero 22). *Guía completa: El TPU en la impresión 3D*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-tpu-040620202/>
29. M, A. (2023b, octubre 3). *Las características de Cura, el slicer más extendido en el mercado de la impresión 3D*. 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/cura-laminador-para-impresion-3d-250320202/>
30. MITOV, A. (2019). Implementation of Embedded Three-Loop Control Algorithm for Electrohydraulic Power Steering System. *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ELMA.2019.8771478>
31. NKE. (2021, julio 13). Autodesk Inventor: Qué es y sus ventajas | NKE. *Software, consultoría y formación para la Construcción y el Diseño Industrial | NKE (NTI Group) | Autodesk Partner Platinum*. <https://www.nke360.es/autodesk-inventor-que-es-y-ventajas/>
32. Olavarría Lepe, D. (2019). *Diseño y fabricación de máscara para lesiones deportivas*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/131374>
33. *Órtesis o dispositivos de apoyo externo*. (s. f.). Recuperado 6 de febrero de 2024, de <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/ortesis-o-dispositivos-de-apoyo-externo>
34. Popescu, D., Baciú, F., Vlăsceanu, D., Marinescu, R., & Lăptoiu, D. (2023). Investigations on the Fatigue Behavior of 3D-Printed and Thermoformed Polylactic Acid Wrist-Hand Orthoses. *Polymers*, *15*(12), 2737. <https://doi.org/10.3390/polym15122737>
35. Popescu, D., Stochioiu, C., Baciú, F., & Iacob, M. C. (2023). 3D-Printed Polycaprolactone Mechanical Characterization and Suitability Assessment for Producing Wrist-Hand Orthoses. *Polymers*, *15*(3), 576. <https://doi.org/10.3390/polym15030576>
36. Raj, R., Dixit, A. R., Łukaszewski, K., Wichniarek, R., Rybarczyk, J., Kuczko, W., & Górski, F. (2022). Numerical and Experimental Mechanical Analysis of Additively Manufactured Ankle-Foot Orthoses. *Materials (Basel, Switzerland)*, *15*(17), 6130. <https://doi.org/10.3390/ma15176130>
37. Raux, S., Kohler, R., Garin, C., Cunin, V., & Abelin-Genevois, K. (2014). Tridimensional trunk surface acquisition for brace manufacturing in idiopathic scoliosis. *European Spine Journal: Official Publication of the European Spine Society, the European Spinal Deformity*

- Society, and the European Section of the Cervical Spine Research Society, 23 Suppl 4, S419-423. <https://doi.org/10.1007/s00586-014-3337-4>*
38. redaccion. (2021, noviembre 3). Antecedentes de las ortesis y las prótesis. *Prótesis Pies y Manos*. <https://www.protesispiesymanos.com/antecedentes-en-las-ortesis-y-las-protesis/>
 39. *Resumen Ortesis - completo - MATERIALES UTILIZADOS EN T.. ORTOP.. METALES: Los m-s utilizados son el - Studocu.* (s. f.). Recuperado 2 de marzo de 2024, de <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-del-gran-rosario/ortesis-y-protesis/resumen-ortesis-completo/65798757>
 40. Reyes Leiva, K. M., Gato, M. Á. C., & Olmedo, J. J. S. (2023). Estimation of Spatio-Temporal Parameters of Gait and Posture of Visually Impaired People Using Wearable Sensors. *Sensors*, 23(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/s23125564>
 41. Reyes Leiva, K. M., Jaén-Vargas, M., Cuba, M. Á., Lara, S. S., & Olmedo, J. J. S. (2021). A Proposal of a Motion Measurement System to Support Visually Impaired People in Rehabilitation Using Low-Cost Inertial Sensors. *Entropy*, 23(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/e23070848>
 42. *Rhinoceros: ¿Qué características tiene el software de modelado 3D? - 3Dnatives.* (s. f.). Recuperado 6 de marzo de 2024, de <https://www.3dnatives.com/es/rhinoceros-caracteristicas-software-300320202/>
 43. *Rodin4D - Líder mundial en CAD/CAM - Prótesis y órtesis.* (s. f.). Rodin4D. Recuperado 6 de marzo de 2024, de <https://www.rodin4d.com/es/>
 44. Ronca, A., Abbate, V., Redaelli, D. F., Storm, F. A., Cesaro, G., De Capitani, C., Sorrentino, A., Colombo, G., Frascini, P., & Ambrosio, L. (2022). A Comparative Study for Material Selection in 3D Printing of Scoliosis Back Brace. *Materials (Basel, Switzerland)*, 15(16), 5724. <https://doi.org/10.3390/ma15165724>
 45. sinbarreras. (2021, octubre 22). ¿Qué son las órtesis y qué tipos existen? - VALIDA. *Salvaescaleras, Plataformas y Accesibilidad I VALIDA*. <https://www.valida.es/blog/post/que-son-las-ortesis-y-que-tipos-existen/>
 46. Storm, F. A., Redaelli, D. F., Biffi, E., Reni, G., & Frascini, P. (2022). Additive Manufacturing of Spinal Braces: Evaluation of Production Process and Postural Stability in

- Patients with Scoliosis. *Materials (Basel, Switzerland)*, 15(18), 6221. <https://doi.org/10.3390/ma15186221>
47. Su, X., Wang, T., & Guo, S. (2021). Applications of 3D printed bone tissue engineering scaffolds in the stem cell field. *Regenerative Therapy*, 16, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.reth.2021.01.007>
 48. Thomann, G., & de Carvalho, V. A. (2021). Personalized upper limb orthosis necessitates variety of tools during the development process: Hemiplegic child case study. *Disability and Rehabilitation. Assistive Technology*, 16(2), 188-195. <https://doi.org/10.1080/17483107.2019.1646820>
 49. *Ventajas y Desventajas de SolidWorks® – MS Soluciones en Ingeniería.* (s. f.). Recuperado 6 de marzo de 2024, de <https://www.ms-ingenieria.com.mx/dibujo/ventajas-y-desventajas-de-solidworks/>
 50. *Versión más reciente / Abaqus—Dassault Systèmes®.* (s. f.). Recuperado 6 de marzo de 2024, de <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/simulia/productos/abaqus/version-mas-reciente/>
 51. Weiss, H.-R., Tournavitis, N., Nan, X., Borysov, M., & Paul, L. (2017). Workflow of CAD / CAM Scoliosis Brace Adjustment in Preparation Using 3D Printing. *The Open Medical Informatics Journal*, 11, 44-51. <https://doi.org/10.2174/1874431101711010044>
 52. Wojciechowski, E., Chang, A. Y., Balassone, D., Ford, J., Cheng, T. L., Little, D., Menezes, M. P., Hogan, S., & Burns, J. (2019). Feasibility of designing, manufacturing and delivering 3D printed ankle-foot orthoses: A systematic review. *Journal of Foot and Ankle Research*, 12, 11. <https://doi.org/10.1186/s13047-019-0321-6>
 53. Xu, R., Wang, Z., Ma, T., Ren, Z., & Jin, H. (2019). Effect of 3D Printing Individualized Ankle-Foot Orthosis on Plantar Biomechanics and Pain in Patients with Plantar Fasciitis: A Randomized Controlled Trial. *Medical Science Monitor: International Medical Journal of Experimental and Clinical Research*, 25, 1392-1400. <https://doi.org/10.12659/MSM.915045>
 54. Xu, X., Cheng, K.-J., Liu, Y.-F., Fan, Y.-Y., Wang, J. H., Wang, R., Baur, D. A., Jiang, X.-F., & Dong, X.-T. (2021). Experimental validation of finite element simulation of a new custom-designed fixation plate to treat mandibular angle fracture. *Biomedical Engineering Online*, 20(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s12938-021-00851-1>

55. Yan, L., Lim, J. L., Lee, J. W., Tia, C. S. H., O'Neill, G. K., & Chong, D. Y. R. (2020). Finite element analysis of bone and implant stresses for customized 3D-printed orthopaedic implants in fracture fixation. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 58(5), 921-931. <https://doi.org/10.1007/s11517-019-02104-9>
56. Yeh, P.-C., Chen, C.-H., & Chen, C.-S. (2023). Using a 3D-Printed Hand Orthosis to Improve Three-Jaw Chuck Hand Function in Individuals With Cervical Spinal Cord Injury: A Feasibility Study. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 31, 2552-2559. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2023.3273300>
57. Zhu, H., Nesler, C., Divekar, N., Ahmad, M. T., & Gregg, R. D. (2019). Design and Validation of a Partial-Assist Knee Orthosis with Compact, Backdrivable Actuation. *2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 917-924. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2019.8779479>

X. ANEXOS

Vínculo del forms de los artículos seleccionados: [FORMS DE TESIS.xlsx](#)